

道路政策の質の向上に資する技術研究開発

【研究終了報告書】

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		名誉教授
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)	平成25年度[FS]	平成26年度	平成27年度	平成28年度	総 合 計
※端数切り捨て。	1,392	1,394	1,600	1,499	5,885
④ 研究者氏名	(研究代表者以外の研究者の氏名、所属・役職を記入下さい。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 (※平成29年3月31日現在)				
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	<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、炭素繊維シートや鋼板補強などによって表面が覆われた橋梁主桁や床版などは、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、簡便かつ高精度の振動試験方法を提示する。そして、炭素繊維シートや鋼板によって補強された RC 供試体を作製し、3つの耐久性劣化要因(疲労、塩害、凍害)を想定した劣化促進試験を行い、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。また、非破壊試験法の測定精度、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、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。そして、実道路橋の現場試験を行い、本手法の早期実用化に向けた課題の整理と解決を図る。</p>				

⑥これまでの研究経過・目的の達成状況

本研究課題は、以下の3つの個別検討項目 A.~C. に分けて取り組んだ。役割分担を示す。

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

研究経過

- A. **非破壊試験法の高度化**：加振器を用いた簡便かつ高精度の局所振動試験法を開発し、基礎実験によるデータ収集と分析に取り組んだ。そして、共振周波数の実測値を指標として、構造物内部の損傷の大きさを推定できる損傷評価式を導出した。
- B. **健全度評価法の高度化**：疲労、塩害、凍害による損傷レベルと共振周波数の関係を整理した。さらに非破壊試験や構造解析のばらつきを考慮した信頼性評価フローを構築した。そして3つの劣化要因に対し、本手法によって健全性評価が可能となる条件を明確にした。
- C. **道路橋の現場試験**：炭素繊維シートや鋼板接着補強された道路 RC 床版に対して、交通振動の影響下でも測定精度を低下させることなく、本手法によって点検が可能であった。

達成状況：新たな非破壊試験法を提案し、基本特性の解明から構造物の健全性評価(破壊確率の算定)の体系化まで達成できた。さらに現場試験への応用も実用化段階に達していると判断され、今後様々な目視困難箇所の点検・評価への活用が期待される。本研究は斬新な点検技術の開発を核として、基礎研究から応用研究まで、当初の想定以上の成果が得られた。

⑦中間・FS評価で指摘を受けた事項への対応状況

本手法は、加振器によって局所的な振動を励起し、共振周波数(剛性)の低下に着目して、構造物内部の損傷状態を推定する。中間・FS 評価では主に以下の3つの観点からご指摘を頂いた。

指摘事項 1：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健全性が評価できる劣化条件や構造諸元などの適用範囲を示すこと。

対応状況：疲労、塩害、凍害の損傷レベルと共振周波数の関係を整理した。さらに、現場試験における本手法の測定精度を明らかにした上で、これらの劣化要因に対して健全性評価が可能となる損傷状態や構造物の安全性への影響を明確にした。

指摘事項 2：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。

対応状況：共振周波数の実測値を指標にして、構造物内部の損傷の大きさを推定できる損傷評価式を導出した。これにより、劣化の有無と場所だけではなく、劣化の程度も推定可能になった。また、ひび割れの評価(不連続接触問題)にはばらつきが伴うことから、信頼性評価をベースとして、点検・評価のばらつきを考慮した健全性評価手法を構築した。

指摘事項 3：最終年度では、実用化に向けた成果の取りまとめを行うことを考慮されたい。

対応状況：本手法の基本特性の解明から、疲労、塩害、凍害に対する健全性評価の適用条件の整理、そして点検・評価のばらつきを考慮した健全性評価フローの構築まで達成した。さらに、応用検討として、道路橋の現場調査の手順、データ整理と損傷分布図の作成方法を整理した。

③研究成果

本研究は、写真-1の加振器を用いて図-1の局所振動を励起し、共振周波数(剛性)の低下に着目して、構造物内部の損傷状態を推定する。本研究で得られた知見と成果を列挙する。

非破壊試験法の開発と現場試験への応用

- 重さ 1 kg の軽量小型加振器を開発した。(写真-1)
- 局所振動試験による共振周波数の低下に着目して、炭素繊維シートや鋼板によって補強された RC 供試体内部の空隙範囲が同定できた。(図-2)
- 本手法では定常振動を励起するため、上面および下面のいずれからでも内部損傷を捉えられた。(図-2)
- 鋼板、炭素繊維シート、アスファルト舗装の上から加振しても、内部損傷を捉えることができた。(図-2)
- FEM 解析によって実験の妥当性を確認するとともに、共振周波数の実測値を指標にして、構造物内部の空隙の大きさを推定できる損傷評価式を導出した。
- 健全状態を基準とした共振周波数比を劣化指標として、疲労、塩害、凍害の損傷レベルと共振周波数の関係を整理した。(次ページの表)
- 道路橋の現場試験では、交通振動の影響下でも測定精度を低下させることなく、本手法による点検・調査が可能であった。(図-3)
- 炭素繊維シートや鋼板補強された道路橋 RC 床版に対して、共振周波数比の分布図を描き、損傷マップを作成した。(図-3)



写真-1 動電式加振器

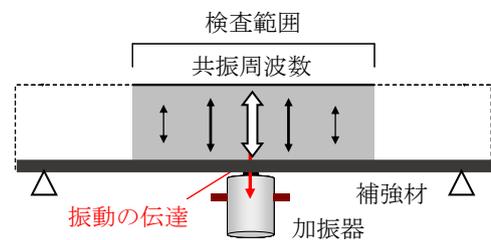


図-1 局所振動試験の概略図

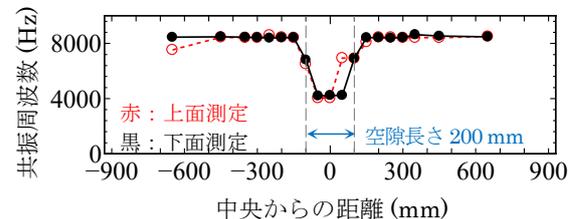


図-2 繊維シート補強供試体の共振周波数分布

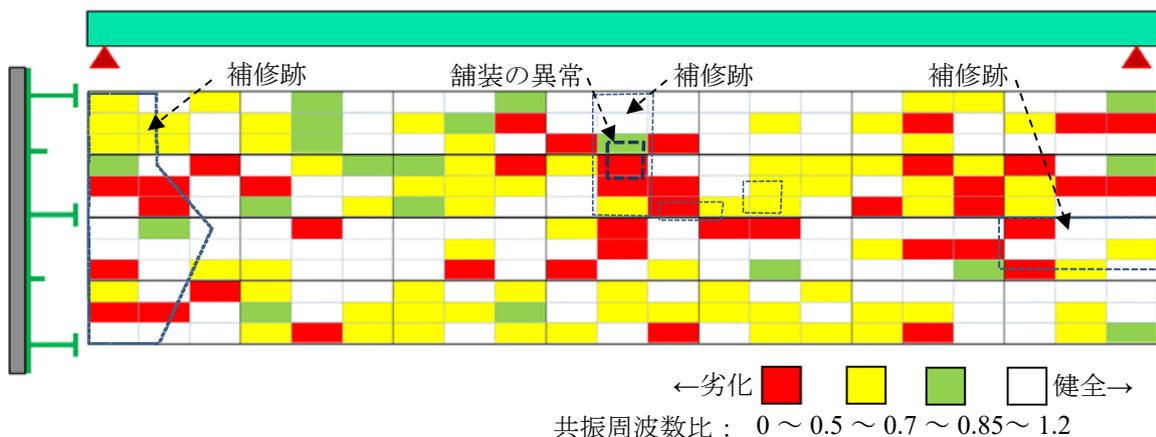


図-3 鋼板接着補強した道路橋 RC 床版の共振周波数比の分布 (損傷マップ)

⑧研究成果(つづき)

各種劣化要因に対する健全性評価への適用性

実験および解析によって、疲労、塩害、凍害の損傷レベルと共振周波数比の関係を整理した。さらに現場試験における本手法の測定精度を明らかにした上で、各種劣化要因に対する健全性評価の適用条件を下表に整理した。

現場試験における本手法の測定精度

データ数：543 個，変動係数：7 %

共振周波数比の 95 % 信頼区間：0.86～1.18

異常を判断する閾値：0.86

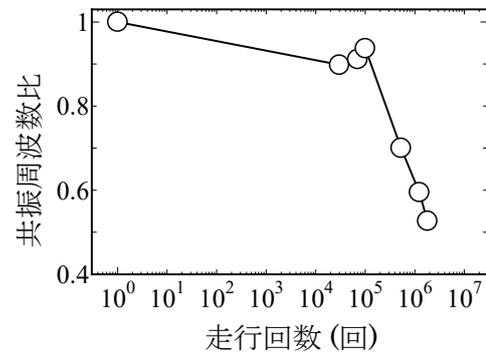


図-4 輪荷重走行による共振周波数の低下

表 疲労、塩害、凍害に対する健全性評価への適用性

劣化要因	損傷状態と共振周波数比 (実験と解析によって得た知見)	本手法の測定精度を踏まえた 健全性評価への適用性
RC 床版の 疲労損傷	疲労限界走行回数 N に対して走行回数 $N/10$ の段階： → 共振周波数比は 0.7 程度 (図-4) 疲労限界状態の直前の状態： → 共振周波数比は 0.5 程度 (図-4)	本手法の閾値 0.86 よりも共振周波数 が低いため、 <u>床版の疲労損傷に対 して予防保全的な点検と維持管理 が可能になる。</u>
RC 桁の 塩害劣化	引張鉄筋の腐食率 10～20 % (腐食ひび 割れが発生している状態)： → 共振周波数比は 0.85～0.9 程度 かぶりが剥落する状態： → 共振周波数比は 0.8 程度	<u>かぶり剥落に対しては、桁上面から でも損傷を捉えられる。しかし、本 手法では、腐食ひび割れを捉えるこ とは難しい。</u>
RC 桁の 凍害劣化	曲げ破壊とせん断破壊の発生確率が逆 転する損傷レベル： → 共振周波数比は 0.75 程度 示方書が定める相対動弾性係数の最低 限界値 70 % → 共振周波数比は 0.84	本手法の閾値 0.86 よりも共振周波 数比が低いため、 <u>桁の凍害劣化に対 して予防保全的な点検と維持管理 が可能になる。</u>

本手法は、炭素繊維シートや鋼板、あるいはアスファルト舗装等によって表面が目視できないコンクリート構造物の点検を可能とする。特に、道路橋 RC 床版の疲労損傷に対する本手法の適用性は高く、既存技術では難しかった床版内部の水平ひび割れを早期に発見し、時間的余裕をもって対策に繋げることが期待される。

⑨研究成果の発表状況

査読付き論文 ※ 受賞論文に○を付けた

- 1) 神宮裕作, 内藤英樹, 鈴木基行: 合成構造における鋼コンクリート付着状態の非破壊評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.2, pp.1027-1032, 2017.7
- 2) 内藤英樹, 小林珠祐, 土屋祐貴, 杉山涼亮, 山口恭平, 早坂洋平, 安川義行, 鈴木基行: 局所振動試験に基づく道路橋 RC 床版の内部損傷評価, 土木学会論文集 E2, Vol.73, No.2, pp.133-149, 2017.4
- 3) 近栄一郎, 八嶋宏幸, 内藤英樹, 松崎裕, 山洞晃一, 鈴木基行: 凍結融解を受けた RC はりの安全性評価に関する基礎的研究, 構造工学論文集, Vol.63A, pp.784-794, 2017.3
- 4) 小林滉季, 高田瞬, 諸橋拓実, 内藤英樹, 鈴木基行: 鋼板や炭素繊維シートによって巻立て補強された RC 部材の損傷評価手法, コンクリート建造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, Vol.16, pp.353-358, 2016.10
- ⑤) 近栄一郎, 内藤英樹, 五十嵐亜季, 鈴木基行: 強制加振試験による RC カルバートの損傷同定に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 38, No. 2, pp. 967-972, 2016.7
- ⑥) 前島拓, 子田康弘, 岩城一郎, 内藤英樹, 岸良竜, 鈴木康範, 大田孝二, 鈴木基行: アルカリシリカ反応が道路橋 RC 床版の耐疲労性に及ぼす影響, 土木学会論文集 E2, Vol.72, No.2, pp.126-145, 2016.5
- 7) 宮村正樹, 内藤英樹, 中野聡, 門万寿男, 岩城一郎, 鈴木基行: 厳しい塩害環境において架替え後 15 年が経過した PC 道路橋の構造的な性能評価に関する研究, 土木学会論文集 E2, Vol.72, No.2, pp.41-55, 2016.4
- 8) 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, コンクリート建造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, Vol.15, pp.471-476, 2015.10
- 9) 諸橋拓実, 上田博之, 安部誠司, 内藤英樹, 鈴木基行: 反共振周波数を指標とした構造ヘルスマモニタリングに関する基礎的研究, 構造工学論文集, Vol.61A, pp.110-118, 2015.3
- 10) 前島拓, 内藤英樹, 子田康弘, 岩城一郎, 鈴木基行: 共振周波数の低下に着目した実道路橋 RC 床版の疲労損傷度評価, 構造工学論文集, Vol.61A, pp.777-787, 2015.3
- ⑪) 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, コンクリート建造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, Vol.14, pp.433-438, 2014.10
- 12) 内藤英樹, 長谷川俊, 上田博之, 鈴木基行: 強制加振試験による RC 部材の曲げひび割れの検知, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.2, pp.781-786, 2014.7
- 13) 土屋祐貴, 八嶋宏幸, 内藤英樹, 王蓓, 山洞晃一, 古賀秀幸, 鈴木基行: 凍結融解によって劣化した RC はりのせん断耐力, 構造工学論文集, Vol.60A, pp.751-760, 2014.3

国際会議

- 1) Takumi Morohashi, Hiroyuki Ueta, Seiji Abe, Hideki Naito and Motoyuki Suzuki: Structural Health Monitoring of Reinforced Concrete Beams by Using Vibration Generator, *Proceedings of the 5th International Conference on Construction Materials*, Paper No.70, USB memory, August 2015, Whistler, BC, Canada
- 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, *Proceedings of the 5th International Conference on Construction Materials*, Paper No.71, USB memory, August 2015, Whistler, BC, Canada

⑨研究成果の発表状況（つづき）

- 3) Hiroyuki Yashima, Kouichi Sando, Hideyuki Koga, Motoyuki Suzuki and Hideki Naito: Evaluating Shear Strength of Reinforced Concrete Beams Deteriorated by Freezing and Thawing Action, *Proceedings of 10th fib International PhD Symposium in Civil Engineering*, pp.241-246, July 2014, Quebec, Canada
- 4) Seiji Abe, Hiroyuki Ueta, Motoyuki Suzuki and Hideki Naito: Seismic Damage Evaluation of RC Members Based on Vibration Characteristics, *Proceedings of 10th fib International PhD Symposium in Civil Engineering*, pp.357-362, July 2014, Quebec, Canada

学会発表 ※ 受賞発表に○を付けた

- 1) 神宮裕作, 内藤英樹: 強制加振試験による SRC 部材の損傷同定, 土木学会東北支部技術研究発表会, V-32, 2017.3
- 2) 古賀秀幸, 安倍敦, 諸橋拓実, 内藤英樹, 鈴木基行: 炭素繊維シート補強された道路橋 RC 床版の健全性点検技術, 土木学会第 71 回年次学術講演会, I-353, pp.705-706, 2016.9
- 3) 内藤英樹, 鈴木基行: 凍害を受けた RC はりのせん断破壊に対する安全性評価, 土木学会第 71 回年次学術講演会, V-262, pp.523-524, 2016.9
- 4) 小林滉季, 内藤英樹, 諸橋拓実, 鈴木基行: 鋼板巻立て補強された RC 部材の地震時損傷評価手法, 土木学会第 71 回年次学術講演会, V-491, pp.981-982, 2016.9
- 5) 近栄一郎, 内藤英樹, 五十嵐亜季, 鈴木基行: 強制加振試験による RC 部材のせん断ひび割れの同定, 土木学会第 71 回年次学術講演会, V-632, pp.1263-1264, 2016.9
- 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
- 10) 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
- 11) 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
- 12) 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
- 13) 諸橋拓実, 内藤英樹, 上田博之, 安部誠司, 鈴木基行: 移動型加振源を用いた RC はりの損傷位置同定に関する基礎的検討, 土木学会第 69 回年次学術講演会, I-044, pp.87-88, 2014.9
- 14) 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
- 15) 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
- 16) 八嶋宏幸, 土屋祐貴, 山口恭平, 早坂洋平, 内藤英樹, 鈴木基行: 振動試験に基づく実道路橋 RC 床版の疲労損傷評価, 土木学会第 69 回年次学術講演会, I-021, pp.41-42, 2014.9

⑨研究成果の発表状況（つづき）※受賞発表に○を付けた

- 17) 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によって補強された RC はりの損傷評価, 土木学会東北支部技術研究発表会, V-54, 2014.3
- 18) 諸橋拓実, 内藤英樹, 上田博之, 安部誠司, 鈴木基行: RC 桁を対象とした構造ヘルスマニタリング技術の開発, 土木学会東北支部技術研究発表会, V-55, 2014.3
- 19) 土屋祐貴, 小林珠祐, 八嶋宏幸, 内藤英樹, 早坂洋平, 光岡達也, 鈴木基行: 強制加振試験に基づく RC 床版供試体の健全性診断, 土木学会第 68 回年次学術講演会, I-405, pp.809-810, 2013.9
- 20) 内藤英樹, 小林珠祐, 土屋祐貴, 八嶋宏幸, 山田金喜, 早坂洋平, 鈴木基行: 強制加振試験に基づく実道路橋 RC 床版の健全性診断, 土木学会第 68 回年次学術講演会, I-406, pp.811-812, 2013.9
- 21) 上田博之, 長谷川俊, 笠原康平, 内藤英樹, 鈴木基行: 振動試験に基づく RC 橋脚の地震時損傷評価に関する基礎的研究, 土木学会第 68 回年次学術講演会, V-140, pp.279-280, 2013.9
- ②②) 八嶋宏幸, 土屋祐貴, 小林珠祐, 内藤英樹, 山洞晃一, 古賀秀幸, 鈴木基行: 凍結融解によって劣化した RC はりのせん断耐力評価, 土木学会第 68 回年次学術講演会, V-286, pp.571-572, 2013.9

⑩研究成果の社会への情報発信

査読付き論文への投稿や, 国内外の学会発表などに積極的に参加し, 研究成果を継続的に発信している. この他にも, 東北地方整備局が主催する EE 東北に技術紹介ブースを出展していることや, 全国区の技術紹介イベント (ハイウェイテクノフェアやコンクリート工学年次大会テクノプラザ) にも積極的に出展し, 研究成果の社会への情報発信に努めている. また, 東北大学のオープンキャンパスでも体験型展示として毎年研究紹介をしており, 多くの高校生や保護者が興味を示していた.



EE 東北'14 での技術紹介
(床版内部の空隙評価)

技術紹介イベントへの出展履歴を以下に示す.

- 1) 2017 年 7 月: コンクリート工学年次大会 2017 にて, 技術紹介ブースを出展した.
- 2) 2017 年 6 月: EE 東北'17 にて, 技術紹介ブースを出展した.
- 3) 2016 年 11 月: ハイウェイテクノフェア 2016 にて, 技術紹介ブースを出展した.
- 4) 2016 年 6 月: EE 東北'16 にて, 技術紹介ブースを出展した.
- 5) 2015 年 11 月: ハイウェイテクノフェア 2015 にて, 技術紹介ブースを出展した.
- 6) 2014 年 6 月: EE 東北'14 にて, 技術紹介ブースを出展した.

⑪研究の今後の課題・展望等

現場試験への応用と基礎データの蓄積

本研究では、可能な限り物理現象を踏まえた上での定式化に努め、また、寸法などの構造諸元に依らないために共振周波数比などの無次元量を指標にして実験データや解析結果を整理した。しかし、既設構造物の構造諸元や劣化性状は多岐にわたるため、今後も橋梁管理者等との共同体制を継続し、現場試験への応用検討や基礎データの収集を予定している。これによって、本手法の早期実用化に繋げるとともに、本手法の高度化にも取り組んでいく。

新たな研究課題への発展

- 本手法は、床版内部の損傷状態を定量的に可視化できる。輪荷重走行試験による基礎検討を継続し、疲労損傷メカニズムの解明にも取り組む。
- 本手法は、曲げひび割れとせん断ひび割れを明確に区分できることから、カルバートや杭基礎などの目視点検が困難な構造物に対して、地震後の健全性評価への応用に取り組む。
- ひび割れ周りの波の回折挙動を解明し、損傷同定の高度化に取り組む。これにより、道路橋床版の舗装の影響を正確に考慮することができ、また、空港滑走路などの重要構造物の点検にも応用できる。

⑫研究成果の道路行政への反映

本研究では、実構造物の現場試験を実施する際に、道路管理者等にフィールド提供の協力を頂いている。研究期間終了後も共同体制を継続しており、今現在も積極的に現場試験を実施している。本手法は、特に道路橋床版の点検・調査において実用化検討が進められている。その具体例を以下に列挙する。

1. 東日本高速道路(株)との共同体制によって、管内の橋梁を対象にして、道路橋 RC 床版の点検・調査を試行的に行っている。
2. 民間の設計・調査コンサルタント会社と協力して、直轄国道を対象に、下面が鋼板や炭素繊維シート補強された道路橋床版の点検・調査を継続的に行っている。この現場試験データは、橋梁点検や補修設計の参考データとして橋梁管理者に提供している。
3. 都市部高速道路の橋梁床版を対象として、本手法による健全性評価を実施した。今後も数年間に1度の測定を行い、健全性をモニタリングする予定である。

以上より、研究成果は高速道路や直轄国道の点検・調査に試行的に取り入れられている。今後は地方自治体との共同体制を提案し、目視困難な道路構造物の点検への活用を進めていきたい。

⑬自己評価

当初の予想以上に成果を得ることができた

本研究の開始当初は、加振器の質量が 10 kg あり、1 測点あたり 5 分程度の測定時間を要していた。橋梁点検の実務に応用するためには、改善点は山積みであり、道のりは果てしなく遠かった。この研究開発制度を受けて、測定機器類の小型軽量化や加振方法の見直しを図ることができ、その結果、加振器の質量は 1 kg まで小型軽量化され、測定時間も 30 秒程度まで短縮できた。

ここから測定が格段に容易となり、当初では想像し得なかった数の実験を行い、また、道路橋などの現場試験でも多くの有用なデータを得ることができた。この膨大な実験データを収集・整理することによって、本手法による点検・評価の高度化と、現場試験への適用性を格段に高めることができた。

なお、本研究の成果は、査読付き論文や学会発表などに随時情報発信している。論文および学会発表のリストは⑨に示したが、そのうち論文 3 件と学会発表 3 件が受賞に選ばれた。本研究成果が高く評価されることも当初は予想しておらず、その後の研究のモチベーションにも繋がった。