

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 18 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K14016

研究課題名（和文）移動型加振源を用いた橋梁の革新的構造ヘルスマニタリング手法の開発

研究課題名（英文）STRUCTURAL HEALTH MONITORING OF CONCRETE BRIDGES BASED ON FORCED VIBRATION TEST BY USING A MOVING EXCITER

研究代表者

鈴木 基行（SUZUKI, Motoyuki）

東北大学・工学研究科・名誉教授

研究者番号：60124591

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,000,000円

研究成果の概要（和文）：小型加振器を用いて構造物の局所的な振動を励起し、共振周波数の低下に着目して、構造物内部の損傷を推定する非破壊試験法を提示した。基礎検討として、模擬空隙を埋め込んだRC床版供試体の局所振動試験を行った。その結果、空隙箇所では共振周波数が顕著に低下することが示された。また、実験データを参照して空隙長さと共振周波数の関係を整理し、共振周波数を指標とした簡便な損傷評価式を導出した。さらに、高速道路橋のRC床版の現場試験でも、小型加振器を用いて局所的な共振周波数が測定でき、共振周波数の低下に着目して、橋梁床版内部の劣化・損傷箇所を推定できる可能性が示唆された。

研究成果の概要（英文）：In this research, a non-destructive testing method by using a shaker was proposed. A damage identification method for inner cracks of RC bridge deck was investigated. A local resonance of RC deck was excited by forced vibration test using a shaker, and local resonance frequencies could be measured. As the experimental results of the RC deck specimens, the local resonance frequencies were significantly decreased on the area including an inner void. The damage estimating equation was proposed based on the linearity relation between the local resonance frequency and the void length. Moreover, as the experimental results of field test on the highway bridge, it was shown that the areas including inner cracks were fairly identified based on the decrease of local resonance frequencies obtained by the forced vibration test.

研究分野：工学

キーワード：構造工学 振動試験 損傷同定 構造ヘルスマニタリング

1. 研究開始当初の背景

我が国では、インフラの老朽化対策が緊急に迫られている。特に道路橋 RC 床版では、床版上面に砂利化などの著しい劣化・損傷が生じる事例が報告されている。道路橋 RC 床版は上面がアスファルト舗装に覆われているため、目視や叩き調査によって床版内部の損傷を早期に発見することが容易でなく、また、床版下面が鋼板や炭素繊維シートなどによって補強されている場合には、床版下面の変状やひび割れが目視できない事例もある。このような床版内部で損傷が発生・進展する目視困難な劣化事例に対して、非破壊試験の活用が期待されている。しかし、既存の非破壊試験法は構造物の表面付近の変状を捉えるものが多く、構造物内部や背面側の損傷を簡易に推定できる手法の開発が望まれる。

2. 研究の目的

研究代表者らは、加振器を用いて構造物の局所的な振動を励起し、共振周波数の低下に着目して、構造物内部の損傷状態を推定する手法(以下、局所振動試験)を検討している。この方法は、すでに機械・航空等の分野において実用されており、ホワイトノイズを用いたランダム加振によって、瞬時に検査対象の周波数応答特性を測定することもできる。しかし、この試験方法を構造物のひび割れ評価に応用した例はなく、測定される振動試験データと損傷程度との関係は十分に整理されていない。

そこで、本研究は床版内部のひび割れ評価を目的として、はじめに模擬空隙を埋め込んだ床版供試体の振動試験データと損傷程度との関係を整理し、損傷評価式を導出する。そして、供用中の道路橋 RC 床版の現場試験を行い、提案手法の適用性について検討した。

3. 研究の方法

(1) 供試体実験による基礎検討

供試体概略図を図-1 に示す。高速道路の仕様を参考にして、供試体寸法は $1.8\text{ m} \times 1.8\text{ m}$ 、床版厚さと舗装厚さはそれぞれ 220 mm と 75 mm とした。はじめにアスファルト舗装のない供試体(N シリーズ)を6体作製し、N シリーズの振動試験が終了した後に、床版上面にアスファルト舗装を転圧した(A シリーズ)。模擬空隙は、図-1 に示すように床版中央の上側鉄筋位置に厚さ 10 mm の発泡スチロール板をコンクリート打設時に埋め込んだ。空隙形状は正方形であり、一辺の空隙長さを $100 \sim 500\text{ mm}$ まで5段階に変化させた。図-1 に示すように床版中央Oを通るx軸を設定し、 50 mm の測定間隔を基本として床版上面から振動試験を行った。

本実験では質量 1.8 kg 、最大加振力 50 N 、可変周波数 $100 \sim 20,000\text{ Hz}$ の動電式加振器を使用した。加振器の基本設定は、正弦波の加速度振幅を 2 m/s^2 に一定制御して、周波数を $500 \sim 10,000\text{ Hz}$ まで3分間で直線的に上昇さ

せた。このとき、加振点付近に圧電式加速度センサを両面テープで貼付して共振曲線を測定した。

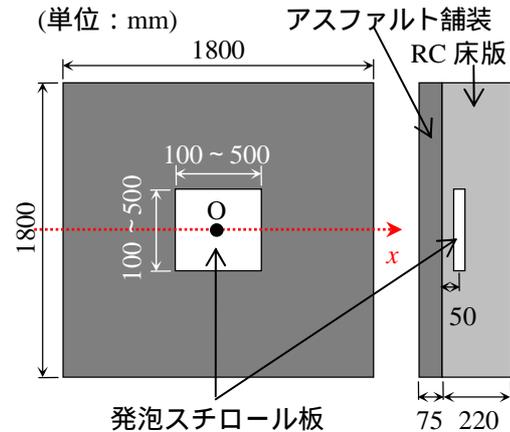


図-1 供試体概略図

(2) 実橋試験による応用検討

高速道路橋を対象にして、図-2 に示すように、床版上面から局所振動試験による点検・調査を試行し、現場試験への適用性を検討した。本橋は橋長 320 m 、有効幅員 9.75 m の鋼連続桁橋であり、1977年に竣工された。床版厚さは 250 mm 、舗装厚さは 75 mm である。

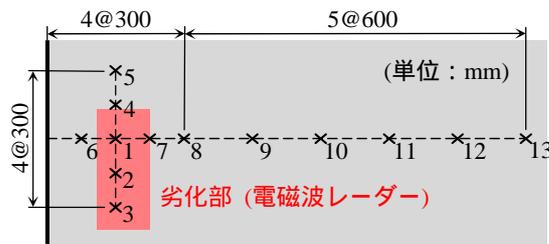
舗装の取り換え工事にあたって、事前に車載型の電磁波レーダーによる橋面調査を実施した。本実験では、i) 舗装開削前に電磁波レーダーによって劣化と判断された箇所、および ii) 舗装開削後にハンマーを用いた叩き調査によって劣化と判断された箇所とその周辺に対して局所振動試験を行った。

測定位置の概略図を図-3 に示す。路肩から走行車線に向かって劣化部を含む21箇所でも局所振動試験を実施した。電磁波レーダーによる劣化部は測点1, 2, 3であり、叩き調査による劣化部は測点14である。なお、測点14は電磁波レーダーの劣化箇所ではなかった。この箇所は壁高欄の基部付近であるため、車載型の電磁波レーダーの射影範囲外であったと考えられる。

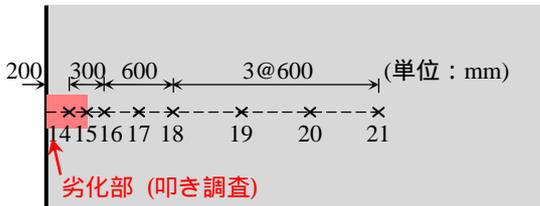
局所振動試験はアスファルト舗装の開削後に実施した。図-2 に示すように、測定時は走行車線を交通規制し、追越車線は供用していた。加振器の基本設定は、正弦波の加速度振幅を 1 m/s^2 に一定制御し、周波数を $500 \sim 10,000\text{ Hz}$ まで18秒間で直線的に上昇させた。このとき、加振点付近に加速度センサを貼付して、共振曲線を測定した。



図-2 道路橋の現場試験状況



壁高欄 (a) 電磁波レーダーによる点検範囲



壁高欄 (b) 叩き調査による点検範囲

図-3 道路橋床版の劣化箇所と測定位置

4. 研究成果

(1) 供試体実験による基礎検討

アスファルト舗装がない N シリーズと舗装を転圧した A シリーズの実験結果を併せて図-4 に示す．舗装の有無に依らず、いずれの供試体でも空隙箇所において共振周波数の低下が確認された．アスファルト舗装上からでも局所振動が励起でき、共振周波数の低下に着目して、床版内部の空隙箇所を同定できる可能性が示唆された．

共振周波数の低下に影響する主な因子として空隙長さに着目し、損傷評価式を導出する．本研究では、健全状態を基準にした共振周波数の比率を共振周波数比と定義した．光学などでは、物体の投影長さが波長より短いと、物体周りに波の回折が生じることが知られている．そこで、床版供試体の他にも既往の実験結果を加えて、空隙長さと共振周波数の関係を図-5 に整理した．図の横軸は、波の回折理論を参考にして、波長に対する空隙長さの割合 D/λ を指標にした．図より、経験的な損傷評価式として式 (1) を導出した．

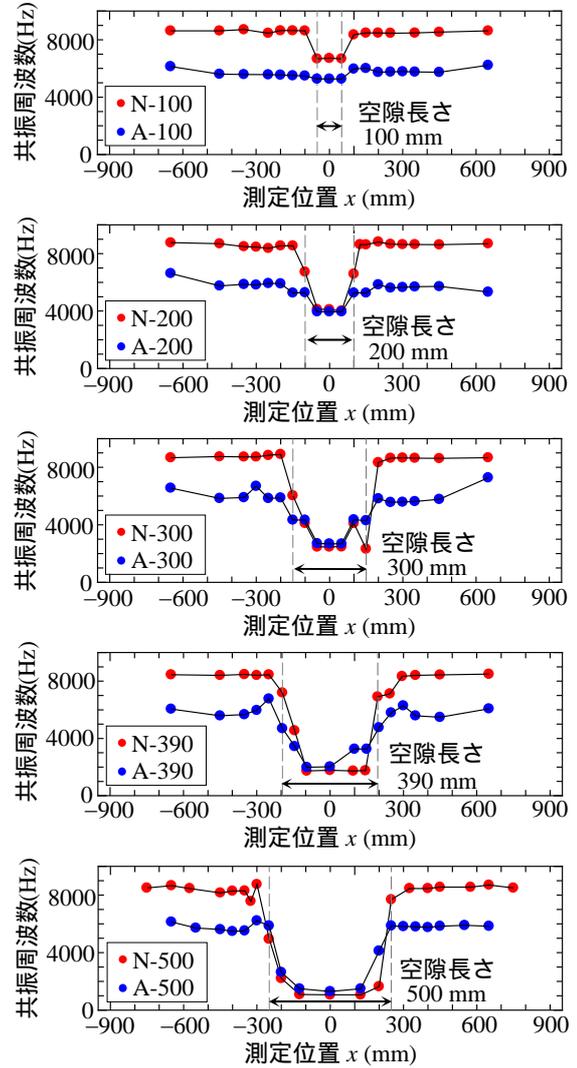


図-4 共振周波数の分布

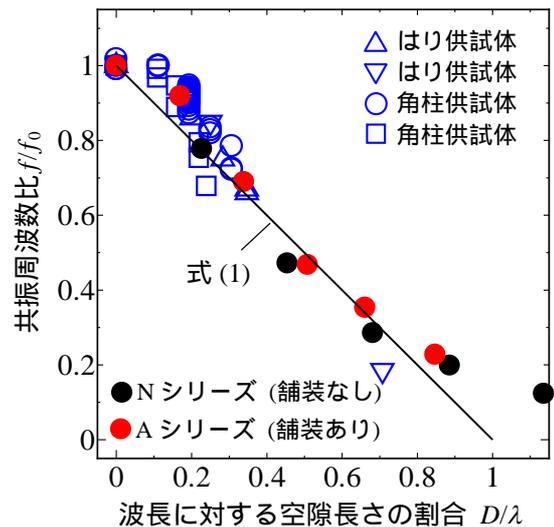


図-5 空隙長さと共振周波数の関係

$$\frac{f}{f_0} = 1 - \frac{D}{\lambda} \quad (1)$$

ここで、 f は共振周波数、 f_0 は健全状態での共振周波数、 D は空隙長さ、 λ は波長であり床

版厚さの2倍が与えられる。図-5に示したプロットの実験値/評価式の平均値は1.01,変動係数は12.5%であった。これにより,局所振動試験の共振周波数を指標にして,式(1)によって構造物内部の空隙長さ D や空隙面積 D^2 を推定することができる。

(2) 実橋試験による応用検討

高速道路床版の測定結果を表-1に示す。データ分析は,はじめに21個のデータの平均値を求め,平均値から20%以上離れたデータを破棄し,再度,残りのデータの平均によって共振周波数の基準値 f_0 (5909 Hz)を求めた。表より,電磁波レーダーあるいは叩き調査によって劣化と判断された測点1, 2, 14では共振周波数も低下した。なお,電磁波レーダーによる劣化箇所の測点3では共振周波数の低下は見られなかったが,本実験で得られたデータのみではその原因は明らかにできなかった。

表-1 振動試験結果

(a) 電磁波レーダーによる点検範囲

測点	共振周波数 (Hz)	共振周波数比
1	4644	0.79
2	3934	0.67
3	6091	1.03
4	6925	1.17
5	5608	0.95
6	6298	1.07
7	5798	0.98
8	5907	1.00
9	6206	1.05
10	5931	1.00
11	5878	0.99
12	5758	0.97
13	6091	1.03

測点1~3は電磁波レーダーによる劣化箇所

(b) 叩き調査による点検範囲

測点	共振周波数 (Hz)	共振周波数比
14	2073	0.35
15	5965	1.01
16	5599	0.95
17	5655	0.96
18	5699	0.96
19	5470	0.93
20	5699	0.96
21	5965	1.01

測点14は叩き調査による劣化箇所

表中には5909 Hzを基準値 f_0 とした共振周波数比も示した。本検討では,電磁波レーダーによる劣化部(測点1, 2)は共振周波数比0.7~0.8程度であった。また,叩き調査による劣化部(測点14)では共振周波数比が0.35まで低下していた。

以上の検討より,道路橋床版の点検・調査に対して局所振動試験の適用可能性が示唆された。局所振動試験は,目視困難な床版内部の水平ひび割れ等の点検・調査に有用であり,道路橋RC床版をはじめとするコンクリート構造物の損傷状態を推定し,合理的な維持管理および長寿命化に貢献することが期待される。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計12件)

- 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,査読有,Vol.39,2017年,掲載決定
- 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,査読有,Vol.73, No.2, pp.133-149,2017年
- 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,査読有,Vol.63A, pp.784-794,2017年
- 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,コンクリート構造物の補修,補強,アップグレード論文報告集,査読有,Vol.16, pp.353-358,2016年
- 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,査読有,Vol.38, No.2, pp.967-972,2016年
- 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,査読有,Vol.72, No.2, pp.126-145,2016年
- 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,査読有,Vol.72, No.2, pp.41-55,2016年
- 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, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, 査読有, Vol.15, pp.471-476, 2015年

- 9) 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, 査読有, Paper No.70, USB memory, 2015年
- 10) 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, 査読有, Paper No. 71, USB memory, 2015年
- 11) 五十嵐亜季, 内藤英樹, 土田恭平, 鈴木基行: 強制加振試験によるコンクリート開水路の損傷評価, コンクリート工学年次論文集, 査読有, Vol.37, No.2, pp.793-798, 2015年
- 12) 平陽兵, 山野辺慎一, 内藤英樹, 鈴木基行: ハーフプレキャストSC部材の曲げ挙動に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, 査読有, Vol.37, No.2, pp.1003-1008, 2015年

〔学会発表〕(計 12 件)

- 1) 神宮裕作: 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年3月4日, 東北工業大学(宮城県・仙台市)
- 2) 内藤英樹: 小型加振器を用いた RC 開水路および合流槽の健全性診断技術, 土木学会東北支部技術研究発表会, V-33, 2017年3月4日, 東北工業大学(宮城県・仙台市)
- 3) 近栄一郎: 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年9月7日, 東北大学(宮城県・仙台市)
- 4) 杉山涼亮: 振動試験に基づくコンクリート開水路の健全性評価, 土木学会第 71 回年次学術講演会, V-572, pp.1143-1144, 2016年9月7日, 東北大学(宮城県・仙台市)
- 5) 小林滉季: 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年9月7日, 東北大学(宮城県・仙台市)
- 6) 内藤英樹: 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年9月7日, 東北大学(宮城県・仙

台市)

- 7) 古賀秀幸: 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年9月8日, 東北大学(宮城県・仙台市)
- 8) 五十嵐亜季: 振動試験に基づくコンクリート水路の点検技術の開発, 土木学会第 70 回年次学術講演会, V-409, pp.817-818, 2015年9月16日, 岡山大学(岡山県・岡山市)
- 9) 内藤英樹: 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年9月18日, 岡山大学(岡山県・岡山市)
- 10) 諸橋拓実: 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年9月18日, 岡山大学(岡山県・岡山市)
- 11) 古賀秀幸: 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年9月16日, 岡山大学(岡山県・岡山市)
- 12) 杉山涼亮: 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年9月16日, 岡山大学(岡山県・岡山市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

鈴木 基行 (MOTOYUKI SUZUKI)
東北大学・工学研究科・名誉教授
研究者番号: 60124591