

**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：若手研究(A)  
研究期間：2013～2016  
課題番号：25709038  
研究課題名(和文) 鋼コンクリート合成構造における目視困難箇所の点検技術の開発と構造性能評価への応用

研究課題名(英文) NON-DESTRUCTIVE TESTING AND EVALUATION OF STRUCTURAL PERFORMANCE FOR AGING STEEL-CONCRETE COMPOSITE STRUCTURES

研究代表者  
内藤 英樹 (NAITO, Hideki)  
東北大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：50361142  
交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 19,300,000円

研究成果の概要(和文)：非破壊試験による合成構造の内部損傷評価手法を構築するため、加振器を用いた強制加振試験の適用性を検討した。実験による基礎検討では、SRCはり供試体を作製して静的載荷試験を行った。段階的な載荷ステップごとに強制加振試験を行い、振動試験データと曲げひび割れおよび鉄骨とコンクリートの付着状態との関係を整理した。その結果、加振器を用いてはり供試体の局所的な振動を励起することができ、共振周波数の低下に着目して、外観変状には表れないSRC構造内部の鉄骨とコンクリートの付着損失の範囲を同定できる可能性が示唆された。

研究成果の概要(英文)：A non-destructive testing method was investigated to identify an inner damage of steel-concrete composite structure. Especially, a forced vibration test was examined in this research. The local vibration of a composite structure was excited by using a portable shaker. And, the resonant frequency changes were measured in the static loading tests of the SRC beam specimens. As the experimental results, the resonant frequency was significantly decreased on the invisible steel-concrete slip area in the SRC beam specimen. It was indicated that the forced vibration testing by using a portable shaker was useful to identify the inner damage of steel-concrete composite structures.

研究分野：工学

キーワード：構造工学 複合構造 振動試験 損傷同定 構造性能評価 安全性評価 信頼性解析

1. 研究開始当初の背景

合成構造は、鋼とコンクリートが相互に拘束することによって高い耐荷性能と変形性能を同時に可能とする。このため、施工の合理化と併せて、従来から様々な場面に合成構造が活用されてきた。そして、構造物の維持管理の重要性を踏まえて、複合構造標準示方書では新たに維持管理編が制定された。しかし、既存の非破壊試験法の多くは表面付近の変状を捉えるものが多く、SRC 構造などのコンクリート内部に鉄骨が埋め込まれる構造形式では、構造物内部のひび割れや鋼コンクリートの付着状態などを点検・調査することは難しい。合成構造の設計では、鋼コンクリートの完全付着を前提とする構造計算もあり、供用中の合成構造の健全性を評価するためには、構造物内部の鋼コンクリートの付着状態を推定できる非破壊試験法の開発が望まれた。

2. 研究の目的

簡便な振動試験を用いて、目視できない構造物内部や背面側の損傷を捉えることが期待される。そこで、本研究では小型加振器を用いた振動試験方法に着目して、合成構造の内部損傷を点検・調査するための非破壊試験法の開発に取り組む。

3. 研究の方法

図 - 1 に示すように、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、構造物内部や背面側の損傷を推定する(以下、局所振動試験)。鋼コンクリートの付着損失によって構造物内部に薄い空隙が生じるならば、鋼コンクリート付着面に直交するように加振して、共振周波数の低下により付着損失が推定できると考えた。

図 - 2 の SRC はり供試体を作製し、静的載荷試験の段階的な荷重ステップごとに強制加振試験を行った。そして、振動試験データと曲げひび割れおよび鋼コンクリート付着状態との関係を整理した。

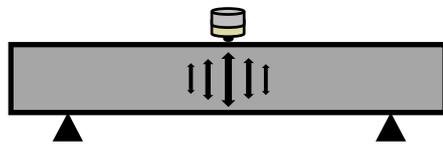


図 - 1 局所振動試験の概略図

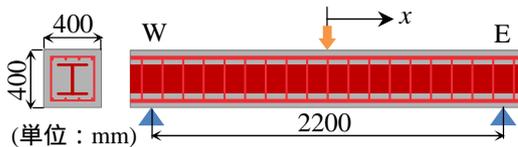


図 - 2 供試体概略図

4. 研究成果

SRC はり供試体の荷重 - 変位関係とひび割れ図を図 - 3 と図 - 4 に示す。供試体は曲げ破壊を呈しており、実験終了まで大きな荷重低下はなかった。ひび割れ図を参照すると、いずれもスパン中央から E 側に斜め方向のひび割れが生じていた。

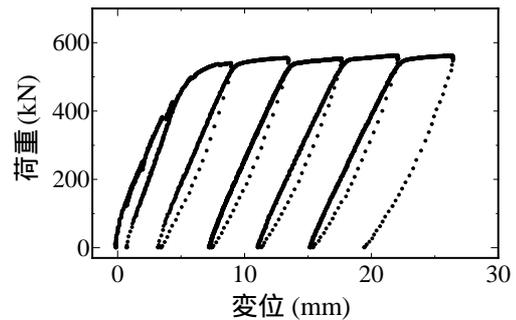


図 - 3 荷重 - 変位関係

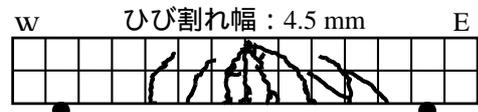


図 - 4 ひび割れ図 (塑性率:  $6\delta_y$ )

図 - 1 の局所振動試験の一例として、 $x = 700 \text{ mm}$  での共振曲線を図 - 5 に示す。載荷前の共振周波数は  $3672 \text{ Hz}$  であったが、 $6\delta_y$  載荷後には  $1988 \text{ Hz}$  まで顕著に低下した。局所振動試験による SRC 供試体の共振周波数の分布を図 - 6 に示す。供試体のひび割れ性状を踏まえると、 $1\delta_y$  載荷の共振周波数の低下は、鉄骨とコンクリートの付着損失によるものと考えられた。さらに  $2\delta_y$  載荷では、スパンのほぼ全域に渡って共振周波数が低下した。ひび割れ図では外観変状のない箇所でも、局所振動試験によって鉄骨とコンクリートの付着損失を捉えられる可能性が示唆された。今後、目視困難な構造物の点検・調査への活用が期待される。

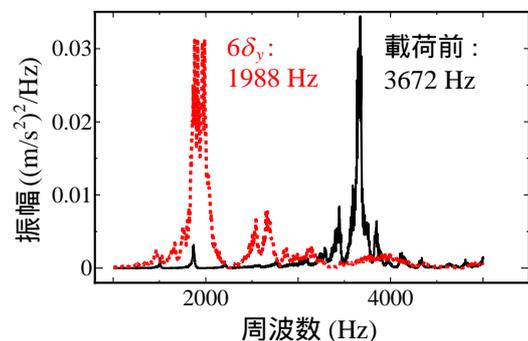


図 - 5 共振曲線

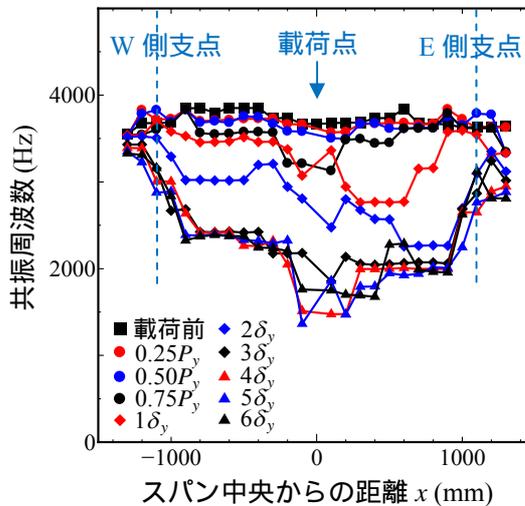


図 - 6 共振周波数の分布

### 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 22 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
- 13) 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onitoringに関する基礎的研究, 構造工学論文集, 査読有, Vol.61A, pp.110-118, 2015年
- 14) 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, 査読有, Vol.61A, pp.777-787, 2015年
- 15) 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, 査読有, Vol.14, pp.433-438, 2014年
- 16) Hiroyuki Yashima, Kouichi Sando, Hideyuki Koga, Motoyuki Suzuki and Hideki Naito: Evaluating Shear Strength of Reinforced Concrete Beams Deteriorated by Freezing and Thawing Action, 10th fib International PhD Symposium in Civil Engineering, 査読有, pp.241-246, 2014年

- 17) Seiji Abe, Hiroyuki Ueta, Motoyuki Suzuki and Hideki Naito: Seismic Dama-ge Evaluation of RC Members Based on Vibration Characteristics, 10th fib International PhD Symposium in Civil Engineering, 査読有, pp.357-362, 2014年
- 18) Kana Yokote, Minoru Takahashi, Jun Murakoshi, Motoyuki Suzuki and Hideki Naito: Non-Destructive Testing for Steel Columns Corroded on Concrete Boundary, 10th fib International PhD Symposium in Civil Engineering, 査読有, pp.387-392, 2014年
- 19) 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, 査読有, Vol.36, No.2, pp.781-786, 2014年
- 20) 土屋祐貴, 八嶋宏幸, 内藤英樹, 王倍, 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, 査読有, Vol.60A, pp.751-760, 2014年
- 21) 内藤英樹, 柏宏樹, 高橋実, 村越潤, 鈴木基行: 鋼コンクリート接合部が腐食欠損した鋼製柱の荷重 - 変位関係, 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.13, pp.299-304, 2013年
- 22) 柏宏樹, 内藤英樹, 高橋実, 鈴木基行: RC フーチングに埋め込まれた鋼製柱基部の腐食と振動特性の関係, コンクリート工学年次論文集, 査読有, Vol.35, No.2, pp.1189-1194, 2013年
- [学会発表](計 32 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)
- 13) 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年3月7日, 東北学院大学(宮城県・多賀城市)
- 14) 諸橋拓実: 補修後に再劣化した RC はりの耐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年3月7日, 東北学院大学(宮城県・多賀城市)
- 15) 高田瞬: 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年3月7日, 東北学院大学(宮城県・多賀城市)
- 16) 五十嵐亜季: 加振器を用いたコンクリート水路の点検手法, 土木学会東北支部技術研究発表会講演概要集, V-24, 2015年3月7日, 東北学院大学(宮城県・多賀城市)
- 17) 八嶋宏幸: 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年9月11日, 大阪大学(大阪府・豊中市)
- 18) 安部誠司: 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 年 9 月 12 日, 大阪大学(大阪府・豊中市)
- 19) 内藤英樹: 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 年 9 月 12 日, 大阪大学(大阪府・豊中市)
  - 20) 佐野善紀: コンクリート埋込部が腐食欠損した H 形鋼柱基部の局所振動特性, 土木学会第 69 回年次学術講演会, CS3-025, pp.49-50, 2014 年 9 月 12 日, 大阪大学(大阪府・豊中市)
  - 21) 横手加奈: コンクリート埋込部が腐食欠損した H 形鋼柱の正負交番載荷実験, 土木学会第 69 回年次学術講演会, CS3-024, pp.47-48, 2014 年 9 月 12 日, 大阪大学(大阪府・豊中市)
  - 22) 諸橋拓実: 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 年 9 月 12 日, 大阪大学(大阪府・豊中市)
  - 23) 五十嵐亜季: 強制加振試験に基づくコンクリート水路の健全性診断, 土木学会第 69 回年次学術講演会, V-152, pp.303-304, 2014 年 9 月 10 日, 大阪大学(大阪府・豊中市)
  - 24) 内藤英樹: 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 年 3 月 8 日, 八戸大学(青森県・八戸市)
  - 25) 諸橋拓実: 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 年 3 月 8 日, 八戸大学(青森県・八戸市)
  - 26) 柏宏樹: 鋼コンクリート境界部が腐食した鋼製柱の変形性能, 土木学会第 68 回年次学術講演会, CS3-021, pp.41-42, 2013 年 9 月 6 日, 日本大学(千葉県・習志野市)
  - 27) 佐野善紀: 鋼コンクリート境界部が腐食した鋼製柱の振動特性, 土木学会第 68 回年次学術講演会, CS3-020, pp.39-40, 2013 年 9 月 6 日, 日本大学(千葉県・習志野市)
  - 28) 横手加奈: コンクリート埋込部が腐食した鋼製標識柱の非破壊検査, 土木学会第 68 回年次学術講演会, VI-100, pp.199-200, 2013 年 9 月 5 日, 日本大学(千葉県・習志野市)
  - 29) 八嶋宏幸: 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 年 9 月 6 日, 日本大学(千葉県・習志野市)
  - 30) 上田博之: 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 年 9 月 6 日, 日本大学(千葉県・習志野市)

- 31) 内藤英樹: 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 年 9 月 4 日, 日本大学(千葉県・習志野市)
- 32) 土屋祐貴: 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 年 9 月 4 日, 日本大学(千葉県・習志野市)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

内藤 英樹 (NAITO HIDEKI)

東北大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 50361142