

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 26 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2013

課題番号：23656284

研究課題名(和文)音響学的考察に基づくコンクリート部材の劣化度診断技術の高度化

研究課題名(英文) DAMAGE EVALUATION METHOD FOR CONCRETE MEMBER BASED ON ACOUSTIC CHARACTERISTIC

研究代表者

鈴木 基行 (SUZUKI, Motoyuki)

東北大学・工学(系)研究科(研究院)・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、(間接経費) 900,000円

研究成果の概要(和文)：加振器を用いたコンクリート部材の周波数スイープ試験の方法を提示した。荷重や鉄筋腐食、凍結融解作用によって損傷を受けた試験体の共振周波数、減衰特性、高次モードの周波数比の変化などを整理した。さらに周波数特性の実測データを速度スペクトルに変換して、音声合成処理することにより、コンクリート部材の音色を再生する方法を示した。健全時のモードの周波数比が整数倍になる棒部材の縦振動に対して、音の高さの変化を聞き取ることで、構造物の損傷程度を判断できる可能性が示唆された。特に、地震などによって大きなひび割れが生じた場合などには、本手法によって損傷判定が容易に行えると考えられる。

研究成果の概要(英文)：The method of the forced vibration test (frequency sweep testing) for the concrete member using a portable shaker was proposed. The relationships between the damage condition (e.g. concrete cracks, corrosion of reinforced steel bars, deterioration by freezing-thawing) of the concrete specimens and the vibration characteristics (e.g. resonance frequency, damping rate, modal frequency ratio) were investigated. Moreover, sound synthesis processing based on the velocity spectrum measured in the forced vibration tests was showed. It was able to listen to the sound pitch and tone of the concrete specimens. When the integer resonance of the concrete specimen was caused, the damage was identified based on the decreased in the pitch of a sound. Especially, the distributed cracks and the flexural cracks in the concrete member were clearly identified.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学 構造工学・地震工学・維持管理工学

キーワード：構造工学 コンクリート工学 振動 音声合成 健全性評価

1. 研究開始当初の背景

(1) 社会インフラの点検

現在、我が国の社会インフラの多くが老朽化を迎える段階にあり、機能と性能を維持しつつ、構造物を補修・補強して長寿命化を図ることが望まれている。このためには、構造物の損傷が顕在化する前に劣化の兆候を発見し、時間的余裕をもって対策することが重要である。現状を踏まえると、点検の高度化が最優先課題であると考えている。

構造物の点検は、主に目視や打音検査によって行われている。しかし、目視点検ではコンクリート内部の損傷を発見することはできず、また、打音検査でも空隙あるいはひび割れが広範囲に生じない限りは、コンクリート内部に生じる損傷を捉えることは難しい。構造物の点検の高度化を図るためには、各種非破壊試験の活用が期待される。

機械分野では、部品の精密検査をはじめとして、様々な損傷探査技術が実用されており、時代とともに技術の高度化が進んでいる。一方、橋梁点検を例にすると、構造物が巨大であることや、車両走行などの様々な外力の影響下で点検を実施する必要があるため、現場試験において構造物の細部に至るまで精密な非破壊試験を実施することは容易ではない。現場試験における作業性や交通への影響を考えると、振動試験や載荷試験は実施が容易であり汎用性も高い。しかし、車両重量による桁のたわみ計測や重錘を用いた衝撃振動試験などの平均的な剛性を評価する従来の手法では、構造物の局所的な劣化の兆候を捉えることはやはり難しい。

以上より、構造物の点検には振動試験の活用が期待されるが、そのためには振動試験方法の抜本的な見直しによる高精度化が必須であり、さらに点検データの処理方法(健全性の評価方法)も併せて検討する必要がある。

(2) 音声合成技術

楽器やオーディオ機器の特性を評価する際に、周波数スイープ試験が活用されている。この方法は、sine 波の周波数を変化させて検査対象を加振することにより、周波数特性(周波数と応答値の関係)を精緻に計測できる。

ところで、PC のメモリ容量の拡大と処理速度の向上によって、声や楽器などの音源を高速フーリエ分析して周波数特性を求め、音の高さを変えて楽曲を演奏する音声合成技術が普及している。特にボーカロイドはその代表格として社会でも広く認知されており、国内のヒットソングを多く生み出し、日本のサブカルチャーとして海外でも大きな反響を呼んでいる。

構造物の大きさや材料の不均質性を度外視すれば、加振器を用いて橋の周波数スイープ試験を行い、周波数特性の実測データを音声合成処理することにより、現場で即時に橋の音楽演奏を聴くことができる。理論的には可能と思える発想であるが、実際に取り組んだ前例はない。

2. 研究の目的

本研究は、コンクリート構造物の点検を高度化するため、その基盤技術として、加振器を用いた周波数スイープ試験方法を開発し、振動試験精度の飛躍的向上に挑む。

さらに、この試験方法によって得られる構造物の周波数特性の実測データを音声合成処理することにより、音の高さや音色を再生する。音声合成技術をベースとして、人の耳に聞きやすい音の作成方法を検討し、音の高さや音色の変化を捉えて構造物の損傷度を判定する診断技術の基礎を築く。

3. 研究の方法

(1) 周波数スイープ試験の検討

重さ 300 g~8 ton に至るまで、様々な構造部材を模擬した試験体を作製する。加振器を用いた周波数スイープ試験によって試験体の周波数特性を計測し、様々な試験体の材料・形状・寸法に対して、加振条件と測定精度の関係を整理する。

また、載荷試験、疲労試験、凍結融解試験、鉄筋の腐食促進試験などの耐久性試験を行い、これらの劣化要因ごとに、試験体の損傷レベルと周波数特性との関係を整理する。

さらに、橋の現場試験を行い、車両走行などの影響下における周波数スイープ試験の測定精度を確認する。

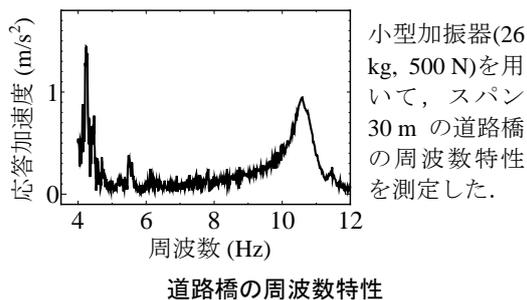
(2) 音声合成技術の検討

上記(1)の周波数特性の実測データを音声合成処理し、構造物の音色を再生する。点検者が音の高さや音色を判別しやすい周波数特性の条件を整理し、音の変化に着目した健全性診断を可能とする構造物の緒元と加振条件を明らかにする。

4. 研究成果

本研究によって得られた知見を列挙する。

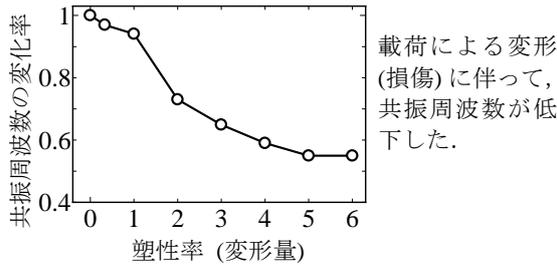
(1) 小型加振器とデジタル振動制御装置を用いて、ワイングラスから道路橋に至るまで、同じ試験方法によって周波数特性を精緻に計測できる手法を提示した。



- (2) コンクリート部材の共振周波数を測定し、その低下に着目して、経年劣化や荷重によるひび割れ、あるいは材料劣化を検知できる可能性が示唆された。



コンクリート試験体の荷重試験

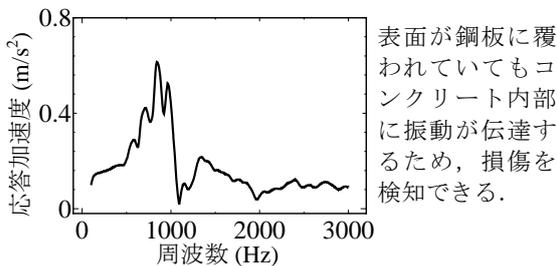


損傷レベルと共振周波数の関係

- (3) 背面が土に覆われた水路、擁壁、橋台などの構造物に対して、前面からの点検が可能であり、構造物内部の損傷を検知できる可能性が示された。
- (4) 鋼板や繊維シートなどによって表面が覆われた場合でも、加振器の振動は構造物内部にまで伝達する。このような目視困難な構造物の点検への応用が期待される。



鋼板接着補強したコンクリート桁の現場試験

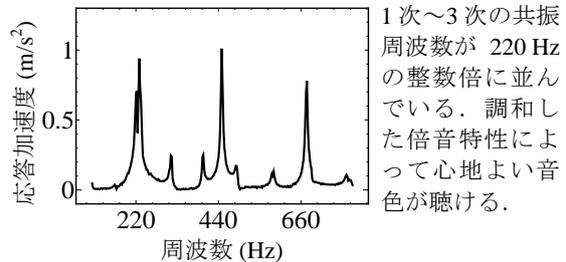


鋼板補強桁の周波数特性

- (5) 周波数特性の実測データを音声合成処理することによって、コンクリート構造物の音色を再生できた。
- (6) 棒部材の縦振動は励起しやすく、実部材でも1次から5次程度までは整数倍に並んだ共振周波数が得られた。このように調和された周波数特性を音声合成処理すると、音の高さや音色を明晰に聞き取ることができた。



コンクリート桁の周波数スイープ試験



コンクリート桁の周波数特性

- (7) 静的荷重、疲労荷重、地震荷重、鉄筋腐食、凍結融解作用に対して、コンクリート試験体の音の高さと音色の変化を調べた。損傷に伴う音の高さ(共振周波数)の低下は耳でも判断しやすいが、音色(周波数比)の変化は判断が難しかった。

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 13 件)

- 1) 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, 2014年 (印刷中)
- 2) 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, 査読有, Vol. 60A, 2014年, 751-760
- 3) 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, 2013年, 299-304
- 4) 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, 2013年, 1189-1194
- 5) 秋山充良, 内藤英樹, 三浦稔, 浅沼大寿, 荒川岳, 武田篤史, 佐藤啓, 鈴木基行: 高強度RC桁の開発とその構造的評価に関する実験的研究, 土木学会論文集E2, 査読有, Vol. 69, No. 1, 2013年, 118-137
- 6) 渡辺孝和, 長谷川俊, 内藤英樹, 鈴木基行: 固有振動数の低下に着目したRC部材の地震時損傷評価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. 34, No. 2, 2012年, 901-906
- 7) 岩岸現, 柏宏樹, 内藤英樹, 鈴木基行: 鋼コンクリート接合部に生じた鋼材腐食量の推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. 34, No. 2, 2012年, 1231-1236
 - 8) 内藤英樹, 山洞晃一, 古賀秀幸, 鈴木基行: 凍結融解作用を受けた腹鉄筋のないRCはりのせん断耐力, コンクリート工学年次論文集, 査読有, Vol. 34, No. 1, 2012年, 916-921
 - 9) 内藤英樹, 大竹雄介, 渡邊孝和, 鈴木基行, 中野聡, 岩城一郎, 木皿尚宏: 反共振周波数に着目したはりの損傷位置同定に関する基礎的研究, 構造工学論文集, 査読有, Vol. 58A, 2012年, 150-161
 - 10) 内藤英樹, 齊木佑介, 鈴木基行, 岩城一郎, 子田康弘, 加藤潔: 小型起振機を用いた強制加振試験に基づくコンクリート床版の非破壊試験法, 土木学会論文集E2, 査読有, Vol. 67, No. 4, 2011年, 522-534
 - 11) 内藤英樹, 林弘, 齊木佑介, 山洞晃一, 古賀秀幸, 鈴木基行: 初期ひび割れを有するコンクリートの凍結融解抵抗性に関する基礎的研究, 土木学会論文集E2, 査読有, Vol. 67, No. 3, 2011年, 436-450
 - 12) Takakazu WATANABE, Hideki NAITO, Yusuke OHTAKE and Motoyuki SUZUKI: A Method for Determining the Location of Cracks in Concrete Beam Using Anti-Resonance Frequency Change, *Proceedings of ATEM' 11*, 査読有, International Conference on Advanced Technology in Experimental Mechanics 2011, OS11F024, CD-ROM, 2011
 - 13) 内藤英樹, 大竹雄介, 齋藤知廣, 鈴木基行: 振動試験に基づくコンクリート部材の損傷同定に関する基礎的検討, コンクリート工学年次論文集, 査読有, Vol. 33, No. 2, 2011年, 949-954
- [学会発表] (計 31 件)
- 1) 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, 2014年3月8日, 八戸
 - 2) 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, 2014年3月8日, 八戸
 - 3) 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, 2013年9月6日, 千葉
 - 4) 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, 2013年9月6日, 千葉
 - 5) 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, 2013年9月6日, 千葉
 - 6) 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, 2013年9月6日, 千葉
 - 7) 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, 2013年9月5日, 千葉
 - 8) 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, 2013年9月4日, 千葉
 - 9) 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, 2013年9月4日, 千葉
 - 10) 内藤英樹, コンクリート埋込部が腐食欠損した鋼製柱の正負交番載荷試験, 土木学会東北支部技術研究発表会, 2013年3月9日, 仙台
 - 11) 佐野善紀, コンクリート埋込部が腐食欠損した鋼製柱の非破壊検査に関する研究, 土木学会東北支部技術研究発表会, 2013年3月9日, 仙台
 - 12) 横手加奈, 道路標識柱の健全性診断に関する基礎的研究, 土木学会東北支部技術研究発表会, 2013年3月9日, 仙台
 - 13) 安部誠司, 鉄筋腐食による付着劣化を考慮したRC部材の構造性能評価に関する基礎的研究, 土木学会東北支部技術研究発表会, 2013年3月9日, 仙台
 - 14) 八嶋宏幸, 凍結融解を受けたRCはりのせん断特性に関する研究, 土木学会東北支部技術研究発表会, 2013年3月9日, 仙台
 - 15) 土屋祐貴, 加振器を用いたRC床版の健全性診断技術, 土木学会東北支部技術研究発表会, 2013年3月9日, 仙台
 - 16) 上田博之, 振動特性の変化に着目したRC橋脚の地震時損傷評価に関する基礎的研究, 土木学会東北支部技術研究発表会, 2013年3月9日, 仙台
 - 17) H. Kashiwa, Vibration and Buckling Characteristics of I-Shaped Steel Column Corroded on Boundary with Concrete, *The 15th World Conference on Earthquake Engineering*, 2012年9月25日, Lisbon
 - 18) 長谷川俊, せん断スパン比が異なるRCはりの変形量と固有振動数の関係, 土木学会第67回年次学術講演会, 2012年9月7日, 名古屋
 - 19) 上田博之, 局所振動試験に基づくRCはりのひび割れ位置の同定, 土木学会第67回年次学術講演会, 2012年9月7日, 名古屋
 - 20) 土屋祐貴, 凍結融解を受けたスターラップのないRCはりのせん断耐力, 土木学会第67回年次学術講演会, 2012年9月6日, 名古屋
 - 21) 佐野善紀, 柱基部が腐食欠損した鋼製柱の座屈解析, 土木学会第67回年次学術講演会, 2012年9月5日, 名古屋
 - 22) 小林珠祐, 疲労荷重を受けたRC床版の内部ひび割れ性状と振動特性に関する研

- 究, 土木学会第 67 回年次学術講演会,
2012 年 9 月 5 日, 名古屋
- 23) 柏宏樹, コンクリート埋込部で腐食欠損
した H 形鋼の強制振動試験, 土木学会第
67 回年次学術講演会, 2012 年 9 月 5 日,
名古屋
- 24) 柏宏樹, 小型起振機による実道路橋の起
振実験, 土木学会第 66 回年次学術講演会,
2011 年 9 月 9 日, 松山
- 25) 王蓓, 鉄筋コンクリートの凍結融解抵抗
性に関する基礎的研究, 土木学会第 66 回
年次学術講演会, 2011 年 9 月 9 日, 松山
- 26) 黒田千砂子, 小型起振機を用いたコンクリ
ート部材の縦振動計測, 土木学会第 66 回
年次学術講演会, 2011 年 9 月 7 日, 松山
- 27) 小林珠祐, 疲労損傷を受けた道路橋 RC 床
版の非破壊検査, 土木学会第 66 回年次学
術講演会, 2011 年 9 月 7 日, 松山
- 28) 岩岸現, 周波数特性に着目したコンクリ
ートはりの損傷位置の同定, 土木学会第
66 回年次学術講演会, 2011 年 9 月 7 日,
松山
- 29) 渡辺孝和, 地盤に埋め込んだ RC 杭の損傷
と固有振動数の関係, 土木学会第 66 回年
次学術講演会, 2011 年 9 月 7 日, 松山
- 30) 渡辺孝和, 共鳴振動試験によるコンクリ
ートはりの損傷同定, 第 65 回セメント技
術大会, 2011 年 5 月 20 日, 東京
- 31) 内藤英樹, 凍結融解作用を受けたポリプ
ロピレン繊維補強コンクリートの引張特
性, 第 65 回セメント技術大会, 2011 年 5
月 19 日, 東京

6. 研究組織

(1) 研究代表者

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

(3) 連携研究者

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