

令和 5 年 4 月 21 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18H01516

研究課題名(和文) 耐震補強後に20年経過したコンクリート橋脚の耐震安全性再評価と地震時損傷評価

研究課題名(英文) Damage detection and safety evaluation for aging concrete structures during large earthquakes

研究代表者

内藤 英樹(Naito, Hideki)

東北大学・工学研究科・准教授

研究者番号：50361142

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、経年劣化や地震によって損傷したコンクリート構造物を対象にして、非破壊検査法を開発する。さらに、測定データの取得から構造性能評価までを含めた健全性診断手法の体系化を目的とした。これまでに、小型加振器と赤外線カメラを用いた点検技術を開発し、機械学習を活用することで、構造物内部の浮きやひび割れを検知できた。さらに、剛体ばねモデルによるコンクリートのひび割れ解析と、有限差分法による弾性波動解析を組み合わせることで、数値シミュレーションにかかる計算時間を大幅に軽減できた。これにより、非破壊検査で得られるデータ分析が容易となり、地震を受けたコンクリート構造物の性能評価も可能となった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

1995年の阪神大震災後に耐震補強したコンクリート構造物は膨大な数に及んでおり、早期に対策されたものは、すでに補強後25年以上が経過している。表面を炭素繊維シートで覆った構造物では、ひび割れを直接目視できないため、経年劣化や地震後の点検が容易でない。本研究は、このような目視困難な既設構造物の非破壊検査法を提示するものであり、持続可能で豊かな社会の実現に大きく貢献できる。また、機械学習による診断手法は、他の非破壊検査法に応用できるなど、研究成果の波及効果が期待される。

研究成果の概要(英文)：In this study, non-destructive testing methods were proposed for damage detection of concrete structures. Effectiveness of local through-thickness vibration testing and infrared camera were examined. As the result, these methods are useful for detecting internal cracks and voids in concrete structures, even the surface is covered with carbon fiber sheets. Moreover, a numerical simulation method with concrete cracking analysis (rigid body spring network model) and wave propagation analyses (finite difference time domain method) was proposed. The calculation tool is useful for anomaly detection of measured data obtained from the local vibration testing. In addition, structural performance of damaged structures for a large earthquake can be evaluated with using the calculation tool.

研究分野：土木工学

キーワード：耐震 コンクリート構造物 非破壊検査 ヘルスモニタリング 振動試験 機械学習 異常検知

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

我が国では、1995年の兵庫県南部地震後に耐震性が不足する既設構造物に対して RC 巻立、鋼板巻立、炭素繊維シート補強などの耐震補強を多く実施してきた。耐震補強から早くは 20 年が経ち、補強箇所の経年劣化が懸念されている。しかし、構造物の外観が炭素繊維シートなどの補強材に覆われているため、経年劣化や地震による構造物内部の損傷状態を点検によって把握することは容易でない。このため、実施が容易かつ精度の良い非破壊検査法の開発と、点検から構造性能評価までを含めた既設構造物の健全性診断の体系化が望まれる。

2. 研究の目的

本研究は、炭素繊維シートや鋼板に覆われたコンクリート構造物を対象にして、i) 補強箇所の経年劣化診断、ii) 地震による構造物内部の損傷診断、および iii) これらの既設構造物の構造性能評価の高度化を目的とする。

3. 研究の方法

上記 2. の目的 i) と ii) は非破壊検査の検討、目的 iii) は構造性能評価の検討である。非破壊検査と構造性能評価の研究方法を、それぞれ以下に示す。

非破壊検査

小型加振器を用いた局所振動試験法を提案する。これまではモーダルパラメータ (e.g. 共振周波数、減衰率) に基づく異常検知を行ってきたが、本研究では、機械学習を用いて診断の高速化と高精度化を目指す。また、局所振動試験による診断手法と併せて、赤外線カメラと機械学習による簡易診断も検討する。局所振動試験は構造物内部の検査を得意とし、赤外線カメラは構造物表面付近の検査に用いることができる。

構造性能評価

剛体ばねモデルによるコンクリートのひび割れ解析を行い、構造物内部のひび割れ状態を再現する。さらに、波動伝搬解析とカップリングすることにより、局所振動試験で励起されるひび割れ周りの波動伝搬挙動を解明する。これにより、非破壊検査の診断精度を高めることができ、地震によって損傷したコンクリート構造物の構造性能評価も可能となる。

4. 研究成果

本研究で得られた主な知見を以下に列挙する。

- (1) 赤外線カメラと機械学習の画像識別技術を組み合わせることで、炭素繊維シート下のコンクリートの浮きや空洞箇所を容易に検知できることを示した。(参考文献 1)
- (2) 小型加振器を用いた局所振動試験方法を提案した。これにより、鋼板接着補強や炭素繊維シートで補強されたコンクリート構造物に対して、補強材の上から、コンクリート内部のひび割れや空隙を検知できた。(参考文献 1-3)
- (3) 波動解析によりコンクリート内部の空隙周りの波動伝搬挙動を可視化できた。これにより、局所振動試験で得られる共振周波数と空隙サイズの線形相関性が示され、共振周波

数を指標として、コンクリート構造物内部の空隙サイズが推定できる評価式を提案した。
(参考文献 2-3)

- (4) 上記(3)の波動解析をひび割れ評価に応用するため、解析検討を行った。実験結果との比較により、幅 0.1 mm 以下のひび割れについては、ひび割れ面での完全反射条件を与えてモデル化できることを示した。さらに、静的な剛体ばねモデルによるコンクリートひび割れ解析と、上記(3)の波動解析を組み合わせることにより、少ない計算時間でのひび割れ-波動伝搬解析が可能となった。(参考文献 5-6)
- (5) 局所振動試験による診断精度の向上させるために、機械学習(オートエンコーダ)による異常検知手法を取り入れた。従来のモーダルパラメータ(共振周波数)による劣化度診断と比較して、機械学習は高精度の診断が可能になることが示唆された。共振周波数と機械学習による2つの診断方法を並べてみることで、構造物内部の損傷診断の高度化が期待できる。(参考文献 7-8)
- (6) 本研究成果の応用展開のひとつとして、空港滑走路と道路橋 RC 床版での現場試験を行った。従来の共振周波数による評価では発見が困難だった軽微な損傷に対しても、機械学習(オートエンコーダ)を用いることで、異常検知できる可能性が示された。(参考文献 9)

参考文献:

- 1) Jian-Cheng Gu, Shigeki Unjoh, Hideki Naito: Detectability of delamination regions using infrared thermography in concrete members strengthened by CFRP jacketing, Composite Structures, Vol. 245, 2020.8
- 2) 古賀秀幸, 内藤英樹, 安倍敦, 宮内健: 炭素繊維シート補強された鋼道路橋 RC 床版の健全性点検技術, 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, Vol. 18, pp. 749-754, 2018.10
- 3) Hideki Naito, John E. Bolander: Damage detection method for RC members using local vibration testing, Engineering Structures, Vol. 178, pp. 361-374, 2019.1
- 4) Hideki Naito, Ryosuke Sugiyama, John E. Bolander: Local Vibration Testing and Damage Evaluation for RC Bridge Decks, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 146, Issue 9, 9 pages, 2020.9
- 5) Hideki Naito, John E. Bolander: Evaluation of internal cracks in RC beams using vibration testing and wave propagation analysis, Proceedings of the 10th International Conference on Bridge Maintenance, Safety, Management, Life-Cycle Sustainability and Innovations, pp. 1665-1671, 2021.4
- 6) Ryu Hashimoto, Hideki Naito, Sonoko Ichimaru Watanabe, John E. Bolander: Simulation of stress wave propagation and cracking in RC beams for damage detection using local vibration testing, Proceedings of the 11th International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management, pp. 1986-1993, 2022.7
- 7) 内藤英樹, 木本智幸, 藤岡光, 藤倉修一, 運上茂樹: 振動測定とオートエンコーダによる RC 部材の地震時損傷の検知, AI・データサイエンス論文集, Vol. 3, No. J2, pp. 134-144, 2022.11
- 8) Yusuke Fujisaku, Hideki Naito, Kohko Inaba: Damage evaluation of concrete beams using forced vibration testing and machine learning, Proceedings of the 11th International Conference on

Bridge Maintenance, Safety and Management, pp. 1213-1219, 2022.7

- 9) Yusuke Fujisaku, Hideki Naito, Yu Shirai, Takuya Maeshima, Sonoko Ichimaru, John E. Bolander: Detecting Delamination of Pavement Layers in Airfield Runways Using Local Vibration Testing and Machine Learning, Proceedings of the 2nd International Conference on Structural Damage Modelling and Assessment, pp. 83-95, 2021.8

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 4件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Gu Jian-Cheng, Unjoh Shigeki, Naito Hideki	4. 巻 245
2. 論文標題 Detectability of delamination regions using infrared thermography in concrete members strengthened by CFRP jacketing	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Composite Structures	6. 最初と最後の頁 1-11
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.compstruct.2020.112328	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Naito Hideki, Sugiyama Ryosuke, Bolander John E.	4. 巻 146
2. 論文標題 Local Vibration Testing and Damage Evaluation for RC Bridge Decks	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Structural Engineering	6. 最初と最後の頁 1-9
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002740	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Natsume T, Ichimaru S, Naito H, Bolander J	4. 巻 10
2. 論文標題 Evaluation of interface fracture in model concrete	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of the 10th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures	6. 最初と最後の頁 1-7
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.21012/FC10.232582	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 古賀秀幸, 内藤英樹, 安倍敦, 宮内健	4. 巻 18
2. 論文標題 炭素繊維シート補強された鋼道路橋RC床版の健全性点検技術	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 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	6. 最初と最後の頁 749 ~ 754
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hideki Naito, John E. Bolander	4. 巻 178
2. 論文標題 Damage detection method for RC members using local vibration testing	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Engineering Structures	6. 最初と最後の頁 361 ~ 374
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.engstruct.2018.10.031	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Naito Hideki, Bolander John. E.	4. 巻 10
2. 論文標題 Evaluation of internal cracks in RC beams using vibration testing and wave propagation analysis	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of the 10th International Conference on Bridge Maintenance, Safety, Management, Life-Cycle Sustainability and Innovations	6. 最初と最後の頁 1665 ~ 1671
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1201/9780429279119-227	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計17件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 内藤英樹
2. 発表標題 局所振動試験による空港滑走路アスファルト舗装の層間剥離評価手法の検討
3. 学会等名 土木学会第75回年次学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 村川達郎
2. 発表標題 新幹線軌道スラブの健全度評価に関する解析的研究
3. 学会等名 土木学会第75回年次学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 村川達郎
2. 発表標題 機械学習によるコンクリート構造物内部の空隙箇所の判定
3. 学会等名 土木学会東北支部技術研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 橋本龍
2. 発表標題 コンクリート構造物におけるひび割れ周りの弾性波伝搬特性の評価モデル
3. 学会等名 土木学会東北支部技術研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 藤咲友輔
2. 発表標題 機械学習を用いた空港滑走路アスファルト舗装の層間剥離評価手法の検討
3. 学会等名 土木学会東北支部技術研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Minea PHEUN
2. 発表標題 Monitoring of Grouting Compactness in PC Bridges using Temperature Sensors under Heat Conduction of Grout
3. 学会等名 土木学会東北支部技術研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 夏目泰輔
2. 発表標題 異種材料間の境界面剥離の推定に対する共振法の適用性検討
3. 学会等名 土木学会第74回年次学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 PHEUN MINEA
2. 発表標題 鉄骨鉄筋コンクリート部材のひび割れ幅評価法に関する研究
3. 学会等名 土木学会第74回年次学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 村川達郎
2. 発表標題 新幹線軌道スラブの健全度評価に関する解析的研究
3. 学会等名 土木学会東北支部技術研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 石毛恭平
2. 発表標題 炭素繊維シート補強されたRC橋脚の経年劣化と耐荷特性に関する解析検討
3. 学会等名 土木学会東北支部技術研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 古賀秀幸
2. 発表標題 炭素繊維シート補強された鋼道路橋RC床版の損傷進行の把握技術
3. 学会等名 土木学会第73回年次学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 夏目泰輔
2. 発表標題 空隙分散構造に対する共振法の適用性検討
3. 学会等名 土木学会第73回年次学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 神宮裕作
2. 発表標題 局所振動試験とFEM解析によるSRC部材の損傷同定
3. 学会等名 土木学会第73回年次学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Pheun Minea
2. 発表標題 鉄骨鉄筋コンクリート部材のひび割れ幅評価法に関する研究
3. 学会等名 土木学会東北支部技術研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Taisuke Natsume
2. 発表標題 Evaluation of interface fracture in model concrete
3. 学会等名 10th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 牛山琉就、藤咲友輔、内藤英樹、稲葉紅子
2. 発表標題 RCはりにおける局所振動試験および機械学習によるひび割れ検知
3. 学会等名 土木学会第77回全国大会年次学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 橋本龍、内藤英樹、渡邊園子
2. 発表標題 RC部材を対象とした弾性波試験の解析的検討
3. 学会等名 土木学会東北支部技術研究発表会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担 者	運上 茂樹 (Shigeki Unjoh) (60355815)	東北大学・工学研究科・教授 (11301)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
米国	University of California, Davis			