

令和 6 年 6 月 19 日現在

機関番号：56101

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2022～2023

課題番号：22K20454

研究課題名（和文）3次元点群データへの深層学習の適用によるRC構造物の剥落予兆検知技術の開発

研究課題名（英文）Development of prediction and detection technology of spalling for RC structures using 3D point cloud data and deep learning

研究代表者

角野 拓真（Kadono, Takuma）

阿南工業高等専門学校・創造技術工学科・講師

研究者番号：80963264

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、鋼材腐食の進行に伴いコンクリート表面に生じる変形量から鋼材腐食深さを回帰する機械学習モデルを構築し、レーザー測距機等で得られる三次元点群データから鉄筋コンクリート構造物の鋼材腐食によるひび割れや剥離・剥落を検知する手法の開発に資する基礎的な検討を行った。破壊力学に基づく連続体損傷モデルを用いて、かぶり等を変動させた解析結果から、鋼材腐食深さとそれに伴うコンクリート表面の鉛直変位量の関係を整理したデータベースを構築した。構築したデータベースを教師データとして活用し、ニューラルネットワークを援用して鋼材腐食深さの回帰モデルを構築した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

鋼材腐食によるかぶりコンクリートの剥離・剥落予測手法として鋼材腐食深さを指標としたモデルが提案されているものの、鋼材腐食速度が構造物ごとに異なることから実務での適用拡大には至っていない。また、鋼材腐食速度を構造物ごとに精緻に把握しようとする、コンクリートのはつり出しが必要になる場合があることから、非常に労力と時間を要することとなる。そのため、本研究結果を活用し、構造物の表面の変形性状から鋼材腐食深さを推定することが出来れば、劣化の初期段階において、将来的なかぶりコンクリートのひび割れや剥離・剥落を検知・予測することが可能となるため、学術的意義および社会的意義がある研究であると言える。

研究成果の概要（英文）：In this study, a machine learning model was constructed to regress the depth of steel corrosion on the amount of deformation that occurs on the concrete surface as steel corrosion progresses, and a basic study was conducted to contribute to the development of a method to detect cracks, spalling and delamination caused by steel corrosion in reinforced concrete structures from three-dimensional point cloud data obtained with laser ranging equipment. A database was constructed to organise the relationship between the depth of steel corrosion and the associated vertical displacement of the concrete surface, based on the results of analyses using a continuum damage model based on fracture mechanics, in which the cover and other parameters were varied. A regression model for the steel corrosion depth was developed using the database as teacher data and with the aid of a neural network.

研究分野：コンクリート工学

キーワード：鋼材腐食 ひび割れ 剥離・剥落 劣化予測 機械学習

1. 研究開始当初の背景

鋼材腐食によるRC構造物のひび割れや剥離・剥落は、コンクリート片の落下に繋がるため、公衆安全性を脅かす社会的に重大な問題である。例えば、国内の鉄道構造物からのコンクリート片の落下事象は、年間で40～60件程度発生している(国土交通省, 2014)。また、道路構造物も同様であり、コンクリート片落下の発生を予防するために、様々な技術指針等が発表され、維持管理に活用されている。剥離・剥落予測手法として、鋼材腐食深さを評価する劣化予測モデルが提案されているが(図-1, 鉄道総合技術研究所, 2007), 鋼材径やかぶり深さを詳細に把握する必要があることに加えて、周辺の環境条件等に応じた鋼材腐食速度を設定する必要があるため、実務での適用拡大には至っていない。

研究代表者は、目視調査で得られる情報を用いて構造物毎に変動する鋼材腐食速度を同定する手法を提案し、将来的な剥離・剥落範囲を簡易に、かつ高精度に予測する手法を提案している(図-2)。一方で、提案手法は視認可能な情報に基づき鋼材腐食深さを同定する手法であるため、進展期等の劣化期の初期段階において、将来的なかぶりコンクリートのひび割れや剥離・剥落を検知することは、現状では困難である。また、現状の剥離・剥落予測技術は、かぶり深さや中性化深さ等を測定し、それらの情報を活用することが一般的である。一方で、実務では、数多くの構造物を対象にする必要があるため、現場での測定項目を簡素化し、技術者の技術レベルによらず、効率的に変状を検知可能なツールの開発が求められる。

2. 研究の目的

鋼材腐食の進行に伴いコンクリート表面に生じる変形に着目し、鋼材腐食深さとコンクリート表面に生じる鉛直変位量の関係を整理する。整理した情報を教師データとして用いることにより、かぶりコンクリート表面の変形量から鋼材腐食深さを回帰する機械学習モデルを構築する。また、機械学習の構築に用いる説明変数はレーザー測距器等から取得・生成される3次元点群データから取得可能な情報とし、構造物の3次元スキャンデータにより鋼材腐食による変状を検知する手法の構築を目指す。

3. 研究の方法

鋼材腐食の進行に伴いコンクリート表面に生じる変形量の把握は、破壊力学に基づく連続体損傷モデルを用いた損傷シミュレーションにより実施する。2次元平面要素にコンクリートと鋼材をモデル化し、鋼材腐食による膨張変位を鋼材への強制変位として与え解析を実施する(図-3)。変動させるパラメータは、設計基準強度 f_{ck} 、かぶり c および鉄筋径 d とし、それらのパラメータの変動によりコンクリート表面に生じる鉛直変位および水平変位の變動を把握した。

得られた結果を基に、鋼材腐食深さ、変状の種別(変状無、ひび割れ、剥離・剥落)、かぶり、鉄筋径、鋼材中心からの相対的な位置情報に関するデータベースを整理する。整理したデータベースを教師データとして用いて、ニューラルネットワークを援用した鋼材腐食深さの回帰モデルを構築する。目的変数は鋼材腐食深さとし、説明変数はそれ以外のパラメータとする。なお、使用するソフトウェアはR(Ver.4.3.1)とする。

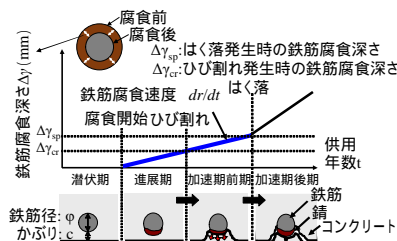


図-1 既往の劣化予測モデル

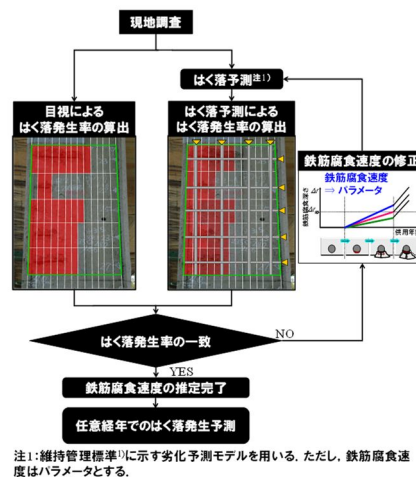


図-2 提案した予測手法

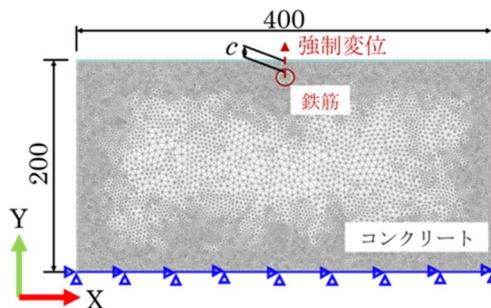


図-3 解析モデルの概要【単位：mm】

4. 研究成果

本研究における解析では、鋼材に 1step あたり 0.001mm の Y 軸方向上方への強制変位を与えることにより、鋼材腐食によるコンクリート内部の腐食膨張を模擬した。解析で得られる膨張変位は、図-4 に示すとおり、コンクリート表面方向のみが膨張することになるため、解析により得られる膨張面積と鋼材全周が一様に腐食する場合の膨張面積が同じであると仮定し、鋼材腐食深さを算定した。なお、腐食生成物の体積膨張率は 2 と仮定し算定した。

図-5 に、解析より得られた損傷変数の分布の一例を示す。損傷変数は、コンクリート内部でどの程度損傷が進展しているかを表す数値であり、損傷変数が高い範囲が連続的に分布している部分を実構造物におけるひび割れと捉えることができる。図-5 より、鋼材腐食により生じる鋼材直上の軸方向ひび割れと鋼材から斜め方向に生じる剥離ひび割れが再現できていることが分かる。図-6 にひび割れが発生する鋼材腐食深さ時 ($\gamma_{cr} = c/d \times 10^{-3} \text{mm}$) の鋼材中心位置直上の Y 方向変位と c/d および $f'_{ck}{}^{2/3}/f'_{ck} \cdot c/d$ との関係を示す。横軸を c/d で整理した図-6(a)に着目すると、両者の関係は線形関係であり、 c/d の増加に伴い鋼材中心位置直上の Y 方向変位も増加することが分かった。一方で、横軸を $f'_{ck}{}^{2/3}/f'_{ck} \cdot c/d$ で整理した図-6(b)に着目すると両者の関係は線形関係であるものの、横軸方向に値のばらつきが発生していることが分かる。このばらつきは、コンクリート強度の影響によるものであると考えられる。すなわち、コンクリートの強度は鉄筋直上の Y 方向変位の増加に多少の影響は与えるものの、その影響は比較的小さいことが分かる。なお、生じる鉛直変位量は 0.02mm 程度から 0.18mm 程度と微小であるが、昨今のレーザー測距器の分解能は 0.05mm 程度であることから、構造物のスキャンからコンクリート表面の微視的な変形性状を抽出し、ひび割れ等の発生を検知できる可能性があることが分かった。

得られた結果を基に、鋼材腐食深さ、変状の種別、かぶり、鉄筋径、鋼材中心からの相対的な位置情報に関するデータベースを整理した。整理したデータベースから、168 個のデータを教師データとして用いて、ニューラルネットワークを援用した回帰モデルを構築した。目的変数は鋼材腐食深さとし、説明変数はそれ以外のパラメータとした。なお、使用したソフトウェアは R (Ver.4.3.1) である。モデル構築にあたり最適化したハイパーパラメータは、中間層のユニット数である size および重量減衰パラメータである decay であり、最適化には k 分割交差検証 (3 分割) を用いた。テストデータとして、コンクリート表面の疑似的な鉛直変位量のデータを 10 個作成し、テストデータの回帰精度の確認を行った。

本研究では、解析により得られたデータを教師データとして用いて、鉛直変位量から鋼材腐食深さを回帰する機械学習モデルの構築を行った。今後は、実構造物を対象に 3 次元点群データを取得し、構築したモデルの回帰性能の検証を行う予定である。

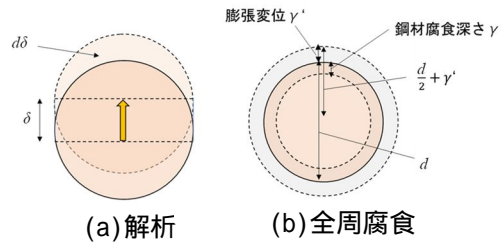
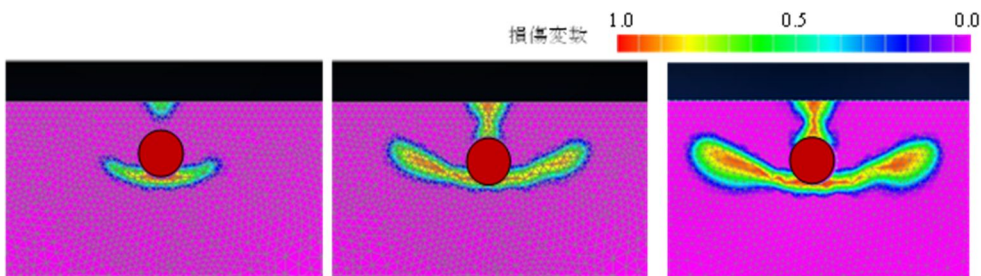


図-4 膨張面積の換算



(a) Step5 ($\gamma=1.59 \times 10^{-3} \text{mm}$) (b) Step10 ($\gamma=3.18 \times 10^{-3} \text{mm}$) (c) Step14 ($\gamma=4.45 \times 10^{-3} \text{mm}$)

図-5 損傷変数の分布 ($f'_{ck} : 18 \text{N/mm}^2$, $c:10 \text{mm}$, $d : 13 \text{mm}$)

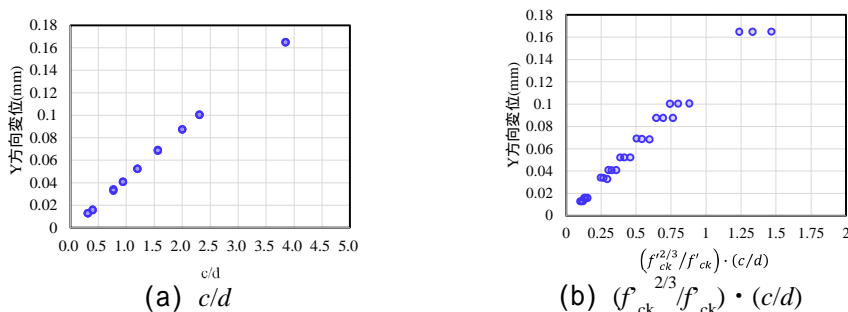


図-6 鉄筋直上の Y 方向変位と c/d および $(f'_{ck}{}^{2/3}/f'_{ck}) \cdot (c/d)$ 関係 (γ_{cr} 時)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 角野拓真, 岡崎慎一郎, 車谷麻緒	4. 巻 投稿中
2. 論文標題 鋼材腐食の進行がコンクリート表面の変形性状に与える解析的検討	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 コンクリート構造物の補修、補強、アップグレードシンポジウム論文集	6. 最初と最後の頁 採択後決定
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 -

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 角野拓真
2. 発表標題 鋼材腐食の進行に伴うコンクリート表面の変形性状に関する解析的検討
3. 学会等名 土木学会
4. 発表年 2022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
研究協力者	慎一郎 岡崎 (Okazaki Shinichiro)		
研究協力者	麻緒 車谷 (Mao Kurumatani)		

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
---------	---------