

敵対的生成ネットワークと腐食ひび割れ情報を用いた劣化 RC 部材内の 2次元鉄筋腐食分布の推定およびその確率的耐荷力評価に関する基礎的研究

早稲田大学 学生会員 ○山田 大樹, 新谷 美菜, Xin Jiyu
早稲田大学 正会員 秋山 充良, Lim Sopokhem

1. はじめに

塩害環境下の鉄筋コンクリート (RC) 構造物は、塩化物イオンにより内部の鉄筋が腐食し、腐食ひび割れが発生することがある。腐食ひび割れ幅は鉄筋腐食率を予測する重要な情報となる一方で、腐食ひび割れ幅と鉄筋腐食率の関係には大きなばらつきがある¹⁾。先行研究²⁾では、1本の引張鉄筋を有する RC はりに対し、両者の関係を機械学習によりモデル化した。しかし、実構造物へ適用するためには、複数の引張鉄筋を有する RC 部材を対象とする必要がある。一方、鉄筋が複数配筋されると、腐食ひび割れ幅と鉄筋腐食率の関係がさらに複雑なものとなり、先行研究²⁾とは異なるアプローチが必要である。

そこで本研究では、3本の引張鉄筋を有する RC はりを対象とし、敵対的生成ネットワーク (GAN) を用いて腐食ひび割れ幅から鉄筋腐食率を予測した。さらに、推定された鉄筋腐食率から劣化 RC はりの曲げ耐力を確率的に評価した。

2. 提案フロー

図-1 に本研究のフローを示す。RC 部材の腐食ひび割れ幅から GAN を用いて鉄筋腐食率を予測し、非線形有限要素解析 (Non-FEA) を Monte Carlo 法により繰り返し行うことで確率的に耐荷力を評価する。

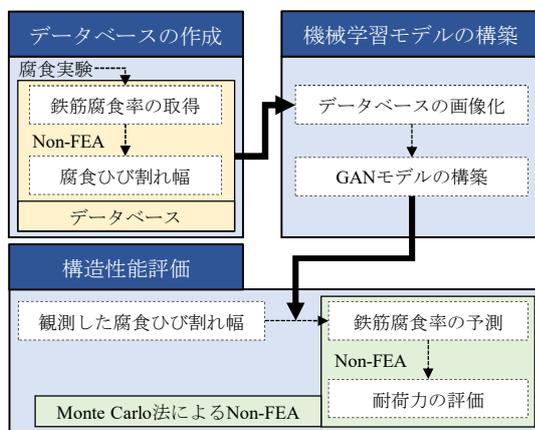


図-1 本研究のフロー

3. データベース

機械学習モデルを構築する際、大量のデータが必要となる。しかし、実験から得られるデータ数は限られているため、解析的に作成することとした。はじめに、鉄筋腐食の空間的なばらつき (空間変動性) を表す自己相関距離と腐食度合いを表す平均鉄筋腐食率から擬似鉄筋腐食率分布を発生させる。Zhang et al.³⁾の電食実験で得られた鉄筋腐食率分布をもとに、軸方向および軸直角方向の自己相関距離を定めた。得られた自己相関距離とランダムに発生させた平均鉄筋腐食率から、Cholesky 分解法を用いて、実験結果³⁾と同等の空間変動性を持つ擬似鉄筋腐食率分布を 100 セット発生させた。次に、擬似鉄筋腐食率分布を有する RC はりから 3次元 Non-FEA を用いて、3本の引張鉄筋下に生じるそれぞれの腐食ひび割れ幅分布を 100 セット取得した。

なお、Non-FEA を行った際、各鉄筋の腐食膨張圧が相互に影響を及ぼし、例えば真ん中に位置する引張鉄筋下の腐食ひび割れを抑制する現象が見られた。複数の引張鉄筋を対象とする場合には、この相互作用を考慮した学習モデルを構築する必要がある。

4. 敵対的生成ネットワーク (GAN)

GAN とは、入力値から類似画像を生成する生成器と真の画像か類似画像かを判定する識別器が敵対的に学習することで、より本物らしい画像を生成するネットワークである。本研究では、GAN の一種であり、画像ペアの関係性を学習可能な pix2pix と呼ばれる学習モデルを鉄筋腐食率の予測に用いた。画像という面的なデータを用いることで、同一 RC 部材内に存在する鉄筋同士の影響を考慮した鉄筋腐食率と腐食ひび割れ幅の関係をモデル化することができる。pix2pix モデルを構築するために、作成したデータベースを画像に変換する。はじめに、腐食ひび割れ幅分布、および鉄筋腐食率分布を部材内の鉄筋位置

に沿って並べた面的なデータに変換した。そして、図-2に示すように、腐食ひび割れ幅 (0~1mm)、および鉄筋腐食率 (0~100%) をそれぞれの輝度値の範囲 (0~255) に数値変換し、8bit のグレースケール画像を得た。

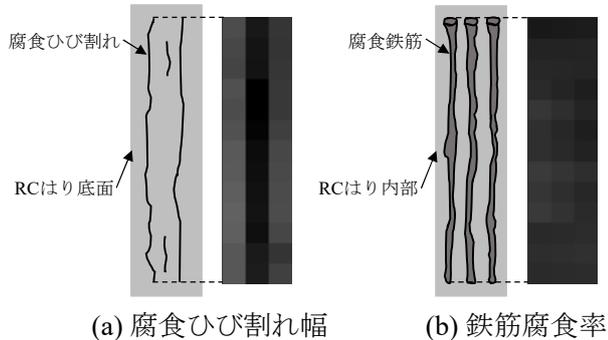


図-2 グレースケールの画像例

次に、画像に変換したデータベースを用いて、pix2pix モデルを構築する。100 個のデータベースのうち、80 個を学習データ、20 個を検証データとした。腐食ひび割れ幅分布から pix2pix を用いて鉄筋腐食率分布を予測した結果と、予測において正とするデータとの比較の一例を図-3 に示す。なお、出力された鉄筋腐食率は画像データであるため、黒が 0%、白が 100%となるように輝度値を数値変換した。

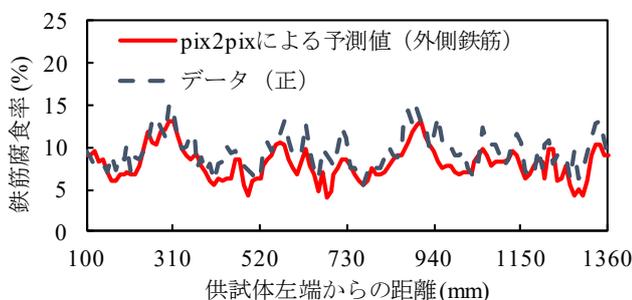


図-3 pix2pix モデルの解析結果の一例 (外側鉄筋)

5. 確率論的耐荷力評価

pix2pix を用いて、腐食ひび割れ幅から耐荷力を求めるケーススタディを行った。スパン 1460mm、高さ 160mm、奥行き 300mm の 3 本の引張鉄筋を有する RC はりを解析対象とする。大きさの異なる 2 つの腐食ひび割れ幅分布 (Case I, Case II) を与条件とした。なお、Case II は、Case I に比べて大きい腐食ひび割れ幅分布を与えている。

それぞれの腐食ひび割れ幅分布から pix2pix を用いて鉄筋腐食率分布を得る。しかし、予測には学習モデルによる誤差が存在するため、Monte Carlo 法ではこの影響を別途考慮する。具体的には、正解値と

予測値の差を表す正規乱数 $\varepsilon_{pix2pix}$ を用いて、鉄筋腐食率 R_w に学習モデルの誤差を考慮した。

$$R_w' = R_w + \varepsilon_{pix2pix} \quad (1)$$

式(1)を用いて、鉄筋腐食率分布を 1000 パターン作成し、3次元 Non-FEA により降伏荷重 P を算出した。さらに、Non-FEA では有限要素モデルによる誤差が存在するため、曲げ試験³⁾結果 P_{exp} とその再現解析結果 P_{FE} の比を表す正規乱数 ε_{FE} を用いて、降伏荷重 P' に有限要素モデルの誤差を考慮した。

$$P' = P \cdot \varepsilon_{FE} \quad (2)$$

式(2)より、Case I, Case II について算出した降伏荷重の確率密度分布を図-4 に示す。

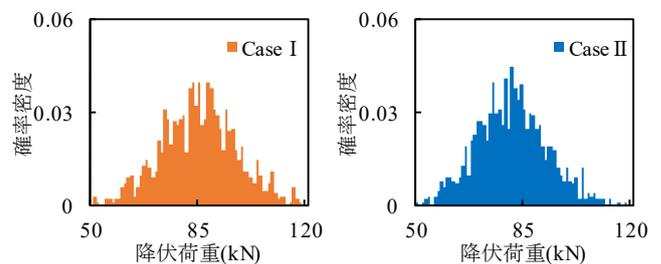


図-4 降伏荷重の確率密度分布

6. 結論

複数の鉄筋を有する RC 部材に対して、pix2pix を用いることで、腐食ひび割れ幅から RC 部材内部の鉄筋腐食率の推定を可能にした。そして、推定された鉄筋腐食率から Monte Carlo 法により Non-FEA を行うことで、劣化 RC 部材の現有耐荷力を確率的に評価することが可能となる。

参考文献

- 1) Lim S., Akiyama M., Frangopol D.M., Jiang H. : Experimental investigation of the spatial variability of the steel weight loss and corrosion cracking of reinforced concrete members : novel X-ray and digital image processing techniques, *Structure and Infrastructure Engineering*, Vol.13, pp.118-134, 2017.
- 2) 新谷美菜, 秋山充良, 張明陽, 辛寄語 : LSTM を用いた腐食ひび割れを有する RC 部材の残存耐荷力推定に関する確率論的考察, AI・データサイエンス論文集, 第 1 巻, J1 号, pp.117-121, 2020.
- 3) Zhang M., Nishiya N., Akiyama M., Lim S., Masuda K. : Effect of the correlation of steel corrosion in the transverse direction between tensile rebars on the structural performance of RC beams, *Construction and Building Materials*, Vol.264, 2020.