

研究テーマ

機械学習・構造解析・信頼性解析・実験アプローチの融合による インフラ構造物の維持管理の高度化

早稲田大学理工学術院創造理工学部社会環境工学科
教授 秋山充良

要旨

塩害環境にある鉄筋コンクリート (RC) 構造物では、かぶりが小さい、あるいは水セメント比が大きいコンクリートが使われると、鉄筋腐食が発生し、その後、その腐食生成物による膨張圧によりコンクリート表面に腐食ひび割れが現れることがある。他のひび割れ要因と異なり、腐食ひび割れは鉄筋の断面欠損に起因するため、RC 部材の耐荷力の低下が懸念される。このため、腐食ひび割れの生じた劣化 RC 部材の構造性能を精度良く評価することは維持管理における重要な作業となる。

一方、鉄筋腐食は、同じ塩害環境に置かれる RC 構造物であっても、部材内で不均一に進展する結果として、鉄筋腐食量とコンクリート表面に現れる腐食ひび割れの関係は極めて大きなばらつきを有している。腐食ひび割れ幅は、RC 部材内部の鉄筋腐食の状態を推定する有力な指標と考えられるが、このばらつきの存在のため、構造性能の定量的評価は困難な状況にある。

著者は、当初、このばらつきに対して、観測情報 (腐食ひび割れ幅) と劣化因子 (鉄筋腐食量など) の関係が非線形であっても、また、そこに非ガウス確率変数が含まれる場合でも適用可能な Sequential Monte Carlo Simulation (SMCS) により、観測情報を用いた劣化因子の同定を試み、認識論的不確定性 (epistemic uncertainty) の低減を試みた。しかし、このアプローチでは、鉄筋腐食量と腐食ひび割れ幅は同一の RC 断面内にある必要があり、その関係が部材全体にわたって同じである、つまり、RC 部材内の鉄筋腐食と腐食ひび割れは部材内で一様であるという仮定が必要であった。前記した実験結果に示されるように、実際には、鉄筋腐食量はある相関性を有しながら部材内で空間的に変動する値をとり、この仮定は実験的に観察される現象と全く異なるものである。さらに、水セメント比やかぶり、鉄筋径などのほか、配筋などの幾何的な違いが腐食ひび割れと鉄筋腐食量の関係に複雑に影響を及ぼしていることから、腐食ひび割れ幅分布から鉄筋腐食量分布を推定するためには、SMCS よりも機械学習のアプローチの方が好ましいと判断し、Artificial Neural Network (ANN) や Long Short-Term Memory (LSTM) を用いた検討を行った。特に LSTM を用いると、腐食ひび割れ幅分布が与えられることで、精度良く鉄筋腐食量分布を再現できるようになり、これと非線形有限要素解析とモデル誤差を考慮した Monte Carlo シミュレーションを実施することにより、腐食 RC はりが保有する曲げ耐力の確率密度関数を予測できるようになった。

一方、参考文献¹⁾では、軸方向鉄筋を 1 本持つ単鉄筋 RC はりを対象としていた。しかし、軸方向鉄筋を 3 本持つ RC はりでは、真ん中に位置する軸方向鉄筋が大きく腐食しても、その直下のコンクリート表面には、両側にある軸方向鉄筋の腐食が影響して腐食ひび割れが発生しないなど、RC はりに生じる腐食ひび割れ幅の分布は、部材内にある複数の軸方向鉄筋の腐食の影響を受けている。つまり、参考文献¹⁾で構築したモデルは、軸方向鉄筋を 1 本のみを有する RC 部材にしか適用できず、一般性を全く有していないことになる。

そこで本研究では、参考文献¹⁾のモデルを拡張し、軸方向に複数本入っている腐食ひび割れ幅分布の情報から、劣化 RC 部材内にある軸方向鉄筋の腐食分布を pix2pix の機械学習モデルを用いて推定した。この場合、軸方向鉄筋の鉄筋腐食量は、各鉄筋の軸方向に相関性を持つばかりでなく、鉄筋相互の腐食分布にも軸直角方向に相関性を有することになる。本研究では、擬似的に作成したデータベースと機械学習モデル (pix2pix) を用いることにより、腐食ひび割れ幅の分布から、RC 部材内部に生じている 2 次元鉄筋腐食分布を推定した。ケーススタディでは、鉄筋腐食分布の推定と非線形有限要素解析に介在するモデル誤差を考慮することで、腐食ひび割れ幅の分布が与えられたとの条件下で対象劣化 RC はりが保有する曲げ耐力の確率密度分布を提示した。

参考文献 : 1) Zhang, M., Akiyama, M., Shintani, M., Xin, J. and Frangopol, D.M.: Probabilistic estimation of flexural loading capacity of existing RC structures based on observational corrosion-induced crack width distribution using machine learning, *Structural Safety*, 91: 102098, 2021.