

(59) 異種特性値の相互相関を考慮した ガウス過程回帰による空間分布推定

中村 朋佳¹・富澤 幸久²・吉田 郁政³・鈴木 修一⁴

¹学生会員 東京都市大学 総合理工学研究科 (〒158-8557 東京都世田谷区玉堤 1-28-1)

E-mail: thomoka1226@gmail.com

²学生会員 東京都市大学 総合理工学研究科 (〒158-8557 東京都世田谷区玉堤 1-28-1)

³正会員 東京都市大学教授 建築都市デザイン学部 都市工学科

(〒158-8557 東京都世田谷区玉堤 1-28-1)

⁴正会員 パシフィックコンサルタンツ株式会社

(〒101-8462 東京都千代田区神田錦町 3-22 テラススクエア)

近年、センシング技術の発展により大量の計測データが取得され、それらを活用したインフラメンテナンスの更なる効率化が課題となっている。ある特性値に関する空間分布が得られた際、その分布を使用して他の特性値の空間分布推定を行うことが考えられる。点検の効率化として、画像処理技術を用いて RC 構造物の面的なひび割れ分布などの検出が行われている。本研究ではそのような技術を想定し、得られたひび割れ幅の空間分布から鉄筋腐食率の空間分布の推定を行う。異種特性値間の相関を利用したガウス過程回帰による空間分布推定手法を用いる。この方法は確率論に基づいており、推定値だけでなくその不確定性も考慮できる。真値が分かっている室内試験結果をもとに鉄筋腐食率の空間分布の推定を行った結果、概ね真値と整合する結果が得られた。

Key Words: gaussian process regression, spatial distribution estimation, crack width, corrosion rate

1. はじめに

近年、ドローンやセンサなどの新技術を用いた計測・点検により大量のデータが蓄積され続け、それらを活用したインフラメンテナンスの更なる効率化・高度化が課題となっている。特性値Aが計測されている場合に特性値Bを推定するにはAからBを推定する回帰式を構築することが多い。これは、点と点の情報を結ぶ考え方であるが、近年のセンシング技術の発展により大量のデータが取得され、特性値Aの空間分布が得られている場合は、それを用いて特性値Bの空間分布を推定することも考えられる。

本報告ではこうした推定を想定し、異種特性値間の相関を利用した空間分布推定方法とその適用例について報告する。空間分布推定手法として、本検討ではガウス過程回帰(Gaussian process regression, 以下 GPR)¹⁾³⁾を使用する。GPRは確率論に基づく手法であり、推定値だけでなく、その不確定性も考慮することが可能である。富澤ら⁴⁾は

異なる種類の地盤物性値を行う際、それらデータ間の相関を考慮した GPR を用いることで、推定精度が向上したことを報告している。

RC 構造物の維持管理では、一般的にひび割れ調査が行われ、その結果に基づいて健全度の評価が行われる。最近、ひび割れ調査技術は飛躍的に進歩し、AI を利用してカメラで撮影した画像を解析し、ひび割れを精度良く自動検出することが可能となりつつある⁵⁾⁶⁾。今後、こうした技術の発展に伴い、膨大なひび割れ調査データが蓄積されるものと予想される。

本研究では、RC 構造物の点検によって得られるひび割れに関する空間分布情報から鉄筋腐食量の空間分布の推定を行う方法について報告し、その適用例を示す。鉄筋腐食量の平均値については鈴木ら⁷⁾によって提案されている平均ひび割れ幅と平均腐食率の回帰式を用いて推定し、その空間分布については複数の特性値の相関性を考えた GPR⁴⁾を用いて推定する。

3. RC 構造物の腐食ひび割れ分布に基づく鉄筋腐食量の空間分布推定

本研究ではひび割れ幅と鉄筋腐食量の空間分布の情報が詳細に得られている大下らの実験結果¹⁴⁾について再現解析を行い、提案方法の推定精度について述べる。

(1) 検討対象とした室内実験結果の概要

大下ら¹⁴⁾は、電食実験により鉄筋を腐食させた RC 梁供試体を用いて曲げ載荷試験を行い、鉄筋腐食した RC 梁部材の残存耐力について実験的な研究を実施しており、ひび割れ幅、鉄筋腐食量に関する詳細な空間分布情報が得られている。供試体は、設計基準強度を 30N/mm²とし、表-1 に示す配合のコンクリートを使用している。

大下らの研究ではいくつかの配筋および腐食率の異なる供試体を作成して検討を実施しているが、そのうち本検討で対象とした RC 梁供試体の形状および配筋を図-1 に示す。3本の主鉄筋は、中央の鉄筋を M 鉄筋、左右の鉄筋は L および R 鉄筋と名付けられている。図-2 に腐食率とひび割れ幅の測定位置を示す。1本の鉄筋に対して42箇所、供試体全体では42箇所×3本=126箇所で測定が行われた。腐食率は、供試体作成前に測定した鉄筋質量と曲げ載荷試験後に測定した鉄筋質量の質量差より算出している。

(2) 平均ひび割れ幅から平均腐食率の推定

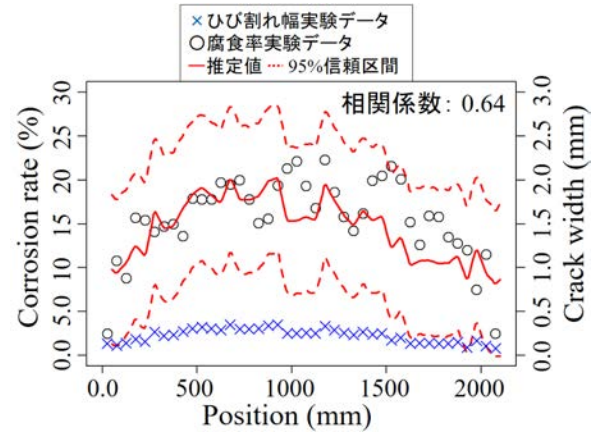
鈴木ら⁷⁾は、多くの鉄筋腐食実験データを収集することでデータベースを作成し、それらを用いてひび割れ幅と腐食率の関係を分析し、式(6)に示す平均ひび割れ幅に基づく平均腐食率の推定式を提案している。

$$\bar{x}_2 = \beta_1 \beta_2 \beta_3 \beta_4 \left\{ 13.70 \exp \left(0.0025 f_c' - \frac{0.237c}{\phi} \right) z + 1.77 \exp \left(-0.0049 f_c' \left(\frac{c}{\phi} \right)^{-0.924} \right) \right\} \quad (6)$$

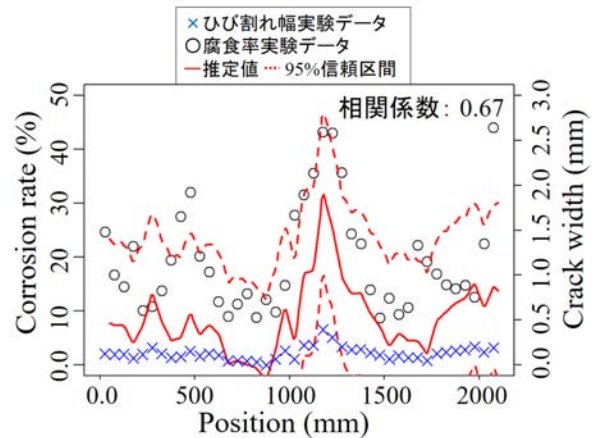
ここで、 $\beta_1 \sim \beta_4$ はカテゴリーデータの回帰係数、 f_c' はコンクリート強度 (N/mm²)、 c は純かぶり (mm)、 ϕ は鉄筋径 (mm)を表す。式(6)は RC コンクリートの設計変数であるコンクリート強度、鉄筋かぶりおよび鉄筋径を考慮して腐食率を推定する式となっている。また、4種類のカテゴリーデータに対応しており、それらの相違を $\beta_1 \sim \beta_4$ で考慮することができる。 β_1 は腐食方法、 β_2 は鉄筋種類、 β_3 はせん断補強筋の有無の相違を考慮、 β_4 は鉄筋配置の係数である。なお、鈴木らの推定式は、1mm 以下の平均ひび割れ幅 1mm を対象にしたものであるため、ひび割れ幅の適用範囲は0-1mmである。推定式の持つばらつきは、標準偏差で3%である。

(3) 鉄筋腐食率の空間分布推定

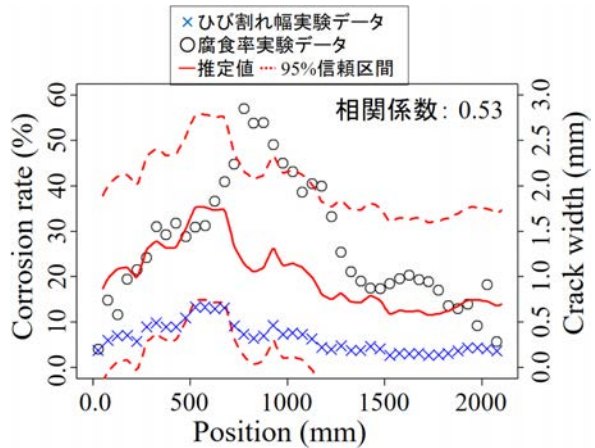
本検討では供試体の各地点について3本の鉄筋によるひび割れ幅及び鉄筋腐食率の平均値を使用しており、そ



(1) GPR と回帰式による平均値, 共に良好: 供試体 No.14



(2) GPR による推定が良好: 供試体 No.4



(3) GPR, 回帰式による平均値, 共に不良: 供試体 No.12

図-5 ひび割れ幅から推定した腐食率

れぞれについての一次元空間分布を対象とする。式(1)において \bar{x}_1, \bar{x}_2 はそれぞれ平均ひび割れ幅, 平均腐食率に対応し, 平均腐食率 \bar{x}_2 は鈴木ら⁷⁾が提案した回帰式より算出する。式(3)に示す2点間の共分散行列は以下の式より算出する。

$$\text{cov}_{k_1, k_2}(d) = \sigma_{k_1} \sigma_{k_2} \text{cor}_{k_1, k_2} \sqrt{\rho_{k_1}(d|\delta_{k_1}) \rho_{k_2}(d|\delta_{k_2})} \quad (7)$$

図中の記号及び添え字は式(3)に示すものと同様である。添え字の k_1 はひび割れ幅, k_2 は腐食率を表している。それぞれに対応した δ (scale of fluctuation) を最尤法によって求める。

推定対象とした18供試体の平均ひび割れ幅と平均腐食率の関係を図-3に示す。図中の数字は供試体番号, 赤丸は式(6)を用いて平均ひび割れ幅から平均腐食率を推定した値である。GPRを用いて異種特性値間の空間分布推定を行う際, その異種特性値間の相関係数や δ (scale of fluctuation) を供試体ごとに求めた。一例として供試体 No.14, No.4 を対象とし, 図-4に標準化変換した(平均との差分を取り, 標準偏差で除した量)ひび割れ幅と腐食率の散布図, ヒストグラム, 及び両者の相関係数を示す。各ケースについて δ (scale of fluctuation) は最尤法によって求めた。

これらの情報を用いて全18供試体についてひび割れ幅から鉄筋腐食率の空間分布を推定した。例として供試体 No.14, No.4, No.12の結果を図-5に示す。それぞれ, 図中の太線が推定された腐食率の空間分布の平均, 点線がその95%信頼区間, ×印がひび割れ幅, ○印が実験で得られた腐食率の空間分布を示している。図-5の(1)は全体的に良好に空間分布が再現されている例, (2)は平均値がずれているが概ね良好に空間分布の特徴が推定できている例, (3)は(1), (2)と比べるとあまり良好ではない例を示している。図-5(1), (2)では95%信頼幅内に真値がほぼ含まれている。(2)は空間分布は良好に再現されているが, 平均値の推定, つまり, 式(6)による平均値の推定が過小評価となっているため, 推定値が全体的に小さくなっている。(3)はひび割れ幅と鉄筋腐食率でピークとなる位置がずれており, こうした場合には正確な推定は困難である。

4. まとめ

本研究では異種特性値間の相関を使用したGPRによる空間分布推定法を示し, その適用例としてRC構造物のひび割れ幅の空間分布に基づく鉄筋腐食率の空間分布推定を報告した。ひび割れ幅と鉄筋腐食率をそれぞれ確率場としてモデル化しており, 推定値だけでなくその信

頼幅を算出することで, 不確定性の大きさを定量的に評価することができた。

今後の検討として算定された鉄筋腐食量の空間分布を基にしたRC構造物の限界状態確率の評価を行う予定である。本手法では不確定性も評価できることから比較的容易にモンテカルロシミュレーションを用いる評価が可能である。さらに将来予測手法への拡張も考えている。観測情報を用いて予測結果の更新を行うデータ同化¹²⁾の代表的手法であるParticle Filter^{13), 14)}を本空間分布推定手法と組み合わせることで, 限界状態確率の将来予測も可能となる。

参考文献

- 1) 持橋大地, 大羽成征: ガウス過程と機械学習, 講談社, 2019.
- 2) Rasmussen.CE., Williams.C.K.I.: Gaussian Processes for Machine Learning, MIT Press, 2006.
- 3) Yoshida, I, Tomizawa, Y, Otake, Y.: Estimation of trend and random components of conditional random field using Gaussian process regression, *Computers and Geotechnics*, Vol. 136, 2021.
- 4) 富澤幸久, 吉田郁政, 大竹雄: ガウス過程回帰を用いた複数の地盤物性値間の相関を考慮した空間分布推定, AI・データサイエンス論文集, Vol.J2, No.2, pp.617-625, 2021.
- 5) 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構: インフラ維持管理・更新等の社会課題対応システム開発プロジェクト紹介冊子(センサシステム技術・イメージング技術・非破壊検査技術), pp.55-58, 2019.
- 6) 佐藤久, 早坂洋平, 永見武司, 小林匠, 増田健: デジタル画像による道路構造物ひび割れ自動検出技術の開発, 土木学会第71回年次学術講演会, pp.1125-1126, 2016.
- 7) 鈴木修一, 黒木亮磨, 吉田郁政: 点検による腐食ひび割れ幅を用いた既設RC構造物の限界状態確率の評価, 構造工学論文集, Vol. 68A, pp.133-145, 2022.
- 8) Cami, B., Javankhoshdel, S., Phoon, K.K. and Ching, J.: Scale of Fluctuation for Spatially Varying Soils: Estimation Methods and Values, *ASCE-ASME J., Civil Engineering*, 6(4), 2020.
- 9) Vanmarck, E.: *Random Fields Analysis And Synthesis*, pp.193-194, World Scientific Publishing corporation, 2010.
- 10) R Core Team R: A language and environment for statistical Computing, R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2020.
- 11) 大下英吉, 川崎佑磨, 高鍋雅則: 鉄筋コンクリート構造物の鉄筋腐食に関する各種非破壊・微破壊診断手法, 非破壊検査, Vol.66, No.3, pp.135-140, 2017.
- 12) 樋口知之: 予測にいかす統計モデリングの基礎—ベイズ統計入門から応用まで, 講談社, 2011.
- 13) 北川源四郎: モンテカルロ・フィルタおよび平滑化について, 統計数理, Vol.44, No.1, pp.31-48, 1996.
- 14) Gordon, N., Salmond, D. and Smith, A.: Novel approach to nonlinear / non-Gaussian Bayesian state estimation, *Proc. of IEE on Radar and Signal Processing F*, 140(2), pp.107-113, 1993.