

河川堤防におけるパイピング耐性の空間変動モデリングと設計断面最適化 Spatial Fluctuation Modeling of Piping Resistance in River Levee

目時 雅隆 (東北大・工) 大竹 雄 (東北大・工) 肥後 陽介 (京都大・工) 吉田 郁政 (東京都市大・工)

Masataka METOKI, Tohoku University

Yu OTAKE, Tohoku University

Yosuke HIGO, Kyoto University

Ikumasa YOSHIDA, Tokyo City University

E-mail: masataka.metoki.r6@dc.tohoku.ac.jp

The river levee is a long and large structure that spreads linearly, and its performance as levee system is lost even when a local failure such as piping failure occurs. However, with the current design method, performance verification is only carried out on one cross section in a series of sections defined by several km sections, and the viewpoint of performance verification as a levee system is insufficient. As seen in the 2012 Yabe River breach, there is concern that piping danger points may be overlooked, so setting priority for countermeasures is important. In this study, we consider spatial interposition based on the actual data of the 34km-benchmark river levee, where the ground survey is carried out at high density, considering the autocorrelation of piping resistance and the inter-index correlation with the index observable from the levee surface. After that, we discuss the possibility of setting the optimum design cross section by introducing the concept of Bayesian optimization.

1. はじめに

平成 24 年の矢部川堤防の決壊は、「越水なき破堤」と呼ばれ、パイピング破壊に起因することが報告されている。線状に広がる河川堤防は、パイピング破壊のような局所的な破壊が生じた場合においても、河川堤防全体（システム）としての性能を消失する。一方、現行設計法¹⁾では、河川堤防を 1km 程度の区間に分割し、その区間内のある代表横断面でのみ照査する。そのため、パイピング破壊のような局所破壊を捉えるには不適切であり、パイピング破壊危険度の河川堤防に沿った縦断方向の変動特性を把握し、効果的な空間内挿法を確立することが重要と考えられる。

著者らは、情報が豊富に整理されているある 1 級河川の堤防 34km を対象に、パイピング破壊を対象とした信頼性解析を連続的に実施してきた。本研究では、パイピング危険度の空間変動特性を明らかにし、効果的な空間内挿法を提案する。具体的には、Yoshida et al.²⁾と富澤他³⁾の手法に基づき、パイピング破壊危険度の自己相関と、堤防表面から観測可能な指標との指標間相関を考慮した空間内挿の有効性を検証する。その上で、適応型実験計画 (Echard et al.⁴⁾) の概念を導入し、最適設計断面設定の可能性を検討する。

2. 研究方法

ある一級河川堤防 34km を対象に、河口から中流域にかけて 50m 間隔 (総計算断面数 $n = 665$) で信頼性解析を実施する。信頼性で考慮する不確かさの中で、パイピング破壊に至る水位 (限界水位) の分布を得た。ここではまず、限界水位の中央値に着目した空間内挿を議論する。対象堤防に沿った限界水位ベクトル $\mathbf{h}_{cr}$ を下のように記述する。

$$\mathbf{h}_{cr} = [h_{cr}^{(1)}, h_{cr}^{(2)}, \dots, h_{cr}^{(n)}]^T$$

このベクトルの一部を観測し、その他を推定する問題を考える。ただし、 $\mathbf{h}_{cr}$ の自己相関構造は複雑な構造を有しており、また設計断面 (調査断面) は 1km 程度離れているため、限界水位の自己相関構造のみで内挿することは困難である。

ここでは、 $\mathbf{h}_{cr}$ の自己相関構造と、河川堤防の形状や表層地盤の層厚等、堤防表面で観測可能な指標との指標間相関構造を同時に考慮したガウス過程回帰モデルを適用し、

$\mathbf{h}_{cr}$ の空間内挿を行うこととした。河川堤防の総幅ベクトルを $\mathbf{B} \in \mathbb{R}^n$ 、計画高水位による平均動水勾配ベクトルを $\alpha \in \mathbb{R}^n$ 、被覆土層 (粘性土) の厚さベクトルを $\mathbf{d} \in \mathbb{R}^n$ とし、これらの指標と $\mathbf{h}_{cr}$ を束ねた状態量ベクトル $\mathbf{x} = [\ln(\Delta \mathbf{h}_{cr})^* \quad \ln(\mathbf{B})^* \quad \alpha^* \quad \mathbf{d}^*]^T$ を定義する。ここで $\Delta \mathbf{h}_{cr}$ は、 $\mathbf{h}_{cr}$ から標高を差し引いた相対限界水位ベクトルである。 $\Delta \mathbf{h}_{cr}$ と $\mathbf{B}$ は、正規分布に近づけるように対数変換している。また、各ベクトルで単位が異なるため、標準化 (“*” は標準化を意味する) を行っている。

Fig.1 は、状態量ベクトル $\mathbf{x}$ の対散分布図を示している。

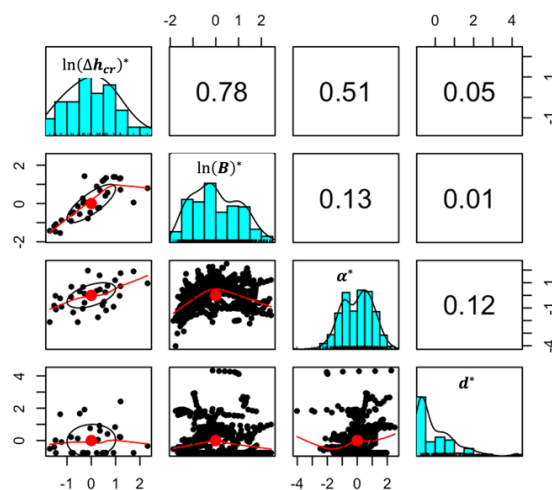


Fig. 1 Scatter plot of state quantity $\mathbf{x}$.

ここで $\mathbf{x}$ を、平均値ベクトル $\bar{\mathbf{x}}$ 、事前情報の不確定性を表す確率変数ベクトル ω を用いて、次式で表現する。

$$\mathbf{x} = \bar{\mathbf{x}} + \omega \quad (1)$$

また、 $\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2$ をそれぞれ観測点と推定点における $\mathbf{x}$ の部分ベクトルとすると、観測方程式を次式で表現できる¹⁾。

$$\mathbf{z} = [\mathbf{I} \quad \mathbf{0}] \begin{bmatrix} \mathbf{x}_1 \\ \mathbf{x}_2 \end{bmatrix} + \mathbf{v} \quad (2)$$

ここで、 $\mathbf{v}$ は観測量誤差である。いま、 ω と $\mathbf{v}$ は平均 0 の正規分布に従い、共分散行列がそれぞれ $\mathbf{M}$ と $\mathbf{R}$ で与えられ、

互いに独立と仮定する。Rはハイパーパラメータとして扱うこととして、次に、Mのモデル化について解説する。まず、xに格納したある1つの指標*i*の共分散行列をMⁱとし、その要素を、自己相関を考慮して次のガウスカーネル関数で与える。

$$\mathbf{M}^i(s, s') = \sigma^2 \exp\left(-\left(\frac{s - s'}{\theta}\right)^2\right) \quad (3)$$

ここで、*s, s'*は位置座標である。また、 σ^2 は状態量分散で事前に標準化を行うため1.0とする。θは自己相関距離で、ハイパーパラメータとする。

さらに、指標*i, j*間の相関係数を $\rho_{i,j}$ 、指標*i, j*間の共分散行列をM^{*i, j*}とし、その要素を、自己相関と指標間相関を考慮して次式で表現する。なお $\rho_{i,j}$ には、Fig.1の標本相関係数を与える。

$$\mathbf{M}^{i,j}(s, s') = \rho_{i,j} \cdot \sqrt{\mathbf{M}^i(s, s') \cdot \mathbf{M}^j(s, s')} \quad (4)$$

以上をもとに、状態量ベクトル $\mathbf{x} = [\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2]^T$ の事後平均ベクトル $\hat{\mathbf{x}} = [\hat{\mathbf{x}}_1, \hat{\mathbf{x}}_2]^T$ と事後共分散Pを次式で定める。

$$\hat{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{x}}_1 \\ \hat{\mathbf{x}}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{11} \\ \mathbf{M}_{12}^T \end{bmatrix} (\mathbf{M}_{11} + \mathbf{R})^{-1} (\mathbf{z} - \bar{\mathbf{x}}_1) \quad (5)$$

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{11} - \mathbf{M}_{11}(\mathbf{M}_{11} + \mathbf{R})^{-1}\mathbf{M}_{11} & \mathbf{M}_{12} - \mathbf{M}_{11}(\mathbf{M}_{11} + \mathbf{R})^{-1}\mathbf{M}_{12} \\ \mathbf{M}_{12}^T - \mathbf{M}_{12}^T(\mathbf{M}_{11} + \mathbf{R})^{-1}\mathbf{M}_{11} & \mathbf{M}_{22} - \mathbf{M}_{12}^T(\mathbf{M}_{11} + \mathbf{R})^{-1}\mathbf{M}_{12} \end{bmatrix} \quad (6)$$

ここで、M₁₁, M₂₂, M₁₂はそれぞれ観測点のみ、推定点のみ、観測点及び推定点が関係する、Mの部分行列である。

次に、適応型実験計画の概念を導入した最適設計断面の選定方法を記述する。MCSの効率的サンプリング法²⁾を参考に、学習関数βが最小の地点を追加調査(設計)断面として選定する。地点*i*の学習関数β⁽ⁱ⁾を次式で定義する。

$$\beta^{(i)} = \frac{\mu_G^{(i)}}{\sigma_G^{(i)}} \quad (7)$$

ここで、 $\mu_G^{(i)}, \sigma_G^{(i)}$ はそれぞれ地点*i*における性能関数*G*⁽ⁱ⁾の期待値と標準偏差である。*G*⁽ⁱ⁾は、越流破壊よりもパイピング破壊を先行させないという設計意図のもと定義する。

$$G^{(i)} = h_{cr}^{(i)} - h_0^{(i)} \quad (8)$$

ここで、 $h_{cr}^{(i)}, h_0^{(i)}$ はそれぞれ、地点*i*における限界水位の事後平均と堤防高さである。なお、 $h_{cr}^{(i)}$ は式(5)で得られる。

3. 研究結果

交差検証法により、提案手法の有効性を検証するために、間引きデータを作成した。一般的な河川堤防の管理実態を想定し、大凡 1km 間隔で信頼性解析が実施されたと仮定して一部のデータを間引いた。そして、間引いていないデータを正解データと見立て、間引きデータを空間内挿したもの(予測値)と比較した。はじめに、Case1: 自己相関のみを考慮した場合と、Case2: 自己相関及び指標間相関を考慮した場合の空間内挿比較結果を Fig.2 に示す。

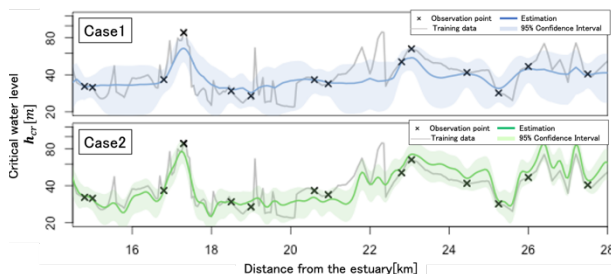


Fig. 2 Spatial interpolation results

なお両者の違いを強調するため、中流域の 15-28km 区間のみを示す。上段は Case1, 下段は Case2 の結果である。自己相関と指標間相関を考慮することで空間内挿の精度が向上していることが確認できる。

次に、Case2 のモデルに対して最適設計断面選定に関する試算を行った。ここでは、全地点のβ=2 以上となるまで断面選定を繰り返した。なお、28km より上流は堤防の特性が変化するため、選定対象外としている。Fig.3 は、最適設計断面選定後の空間内挿結果(上図)と学習関数β(下段)を示している。図中の縦赤点線は、新たに選定された地点を表しており、その間隔から、15-25km 区間で集中的に選定されたことが分かる。なおこの区間は、旧河道や自然堤防が混在し、経験的に河川管理上の課題とされてきた治水地形区間である。

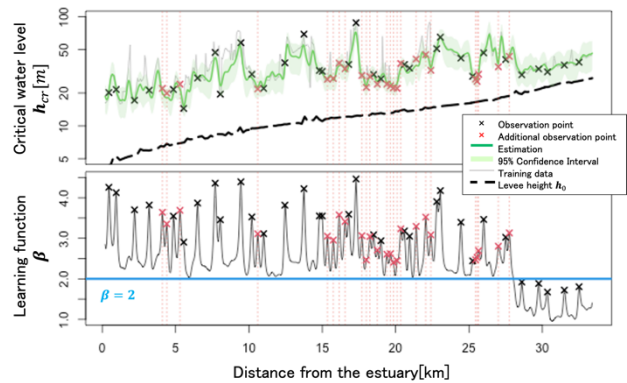


Fig. 3 Extraction of the design cross section.

4. 結論と今後の展望

本研究では、実データに基づき、河川堤防のパイピング破壊危険度の自己相関構造と、堤防表面から観測可能な指標との指標間相関構造を考慮したガウス過程回帰モデルを適用することにより、効果的な空間内挿を実現することができた。さらに、ベイズ最適化に基づいて、追加設計断面設定に関する簡便な試算を行い、パイピング危険箇所の絞り込み法として有効に機能する可能性を示した。

今後は、空間的な非定常性を考慮するモデルへの拡張とともに、階層ベイズ法の導入により統計的推定誤差を考慮したモデルへ拡張する予定である。

参考文献

- 1) 国土交通省河川局治水課. 河川堤防設計指針. 2007
- 2) Ikumasa Yoshida, Yukihisa Tomizawa, and Yu Otake. Estimation of trend and random components of conditional random field using gaussian process regression. Computers and Geotechnics, 136:104179, 2021.
- 3) 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 2 (J2), 2021, 617-625
- 4) B. Echard, N. Gayton, and M. Lemaire. Ak-mcs: An active learning reliability method combining kriging and monte carlo simulation. Structural Safety, 33(2):145-154, 2011.