

## GPR を用いた CPTu に基づくパイピングリスク評価 Evaluation of Piping Potential Based on CPTu Using GPR

○太田大希\*, 西村伸一\*, 柴田俊文\*

OTA Taiki, NISHIMURA shin-ichi, SHIBATA Toshifumi

### 1. はじめに

パイピングは河川堤防の破壊要因の一つで、地盤内の局所的な透水性の違いに起因する。危険箇所特定には透水係数の空間分布把握が必要だが、従来の透水試験では多点計測に時間を要する。本研究では、電気式コーン貫入試験(CPTu)から得られた透水係数推定値を基に、条件付きシミュレーションで三次元透水係数分布を求め、浸透流解析へ適用することで動水勾配の限界値超過確率からパイピング危険箇所を特定する手法を提案する。本稿では、透水係数分布の確率論的表現と浸透流解析によるリスク評価に焦点を当てる。

### 2. 統計モデルによる透水係数分布の推定

三次元透水係数分布を推定するため、ガウス過程回帰(GPR)を用いて調査地の位置座標 $(x, y, z)$ を説明変数、透水係数 $k$ の常用対数を目的変数とする統計モデルを構築した。GPRはカーネル関数により入出力関係を柔軟に表現でき、観測値から未知点の値とその不確実性を同時に予測できる特徴を持つ。本研究では、地盤特性の空間的連続性と局所変動を考慮し、透水係数分布はトレンド成分とランダム成分の合算として表現した。

カーネル関数のハイパーパラメータは最尤推定法とバリオグラム解析を併用した。この結果、表-1に示すように長さスケールが水平方向は大きく、深度方向が小さいという地盤の異方性を反映したパラメータが決定し、適切な統計モデルが得られたといえる。ここで、第一項がトレンド成分、第二項がランダム成分を表している。この統計モデルに基づき、条件付きシミュレーションを適用し、堤体軸方向 $x = 200$  m、軸直交方向 $y = 96$  m、深度方向 $z = 10$  mの空間で 1000 回のシミュレーションを実施した。この手法はサンプル点の値を確定値として扱いつつ、未観測点の不確実性を評価できる特徴がある。図-1に示すシミュレーション結果では、 $y = 0$  m断面の深度 5m 以下に高透水性領域が見られ、 $y$ 座

表-1 統計モデル  
Table 1 Statistical model

Kernel function	
$k((x, y, z), (x', y', z')) = \sigma_1^2 \exp\left(-\left(\frac{ x - x' ^2}{m_x^2} + \frac{ y - y' ^2}{m_y^2} + \frac{ z - z' ^2}{m_z^2}\right)\right) + \sigma_2^2 \exp\left(-\left(\frac{ x - x' }{l_{x2}} + \frac{ y - y' }{l_{y2}} + \frac{ z - z' }{l_{z2}}\right)\right)$ $m_x = \sqrt{2}l_{x1}, \quad m_y = \sqrt{2}l_{y1}, \quad m_z = \sqrt{2}l_{z1}$	
Constant	Scale of fluctuation (m)
trend: $\sigma_1^2 = 0.048$	trend: $l_{x1} = 6500, l_{y1} = 6500, l_{z1} = 10.907$
random: $\sigma_2^2 = 0.004$	random: $l_{x2} = 12.7, l_{y2} = 12.7, l_{z2} = 0.42$

\*岡山大学大学院環境生命自然科学研究科 (Graduate School of Environmental, Life, Natural Science and Technology, Okayama University)

キーワード：地下浸透・地下水流動，数値解析

標増加に伴い透水係数とばらつきが減少している。これはカーネル関数の異方性が反映されたもので、水平方向の長いスケール長と深度方向の短いスケール長による変化特性を示している。ばらつきの減少は、実測データが $y = 0$  m付近に集中し、観測点から離れるほど予測値がトレンド成分に収束するためである。

### 3. 三次元浸透流解析

パイピング危険箇所を特定するため、前章で得られた透水係数分布を用いて浸透流解析を実施した。図-2に示す有限要素モデルは、前章と同じ水平範囲を持ち、深度方向は基礎地盤部( $z: 0 \sim 10$  m)と堤体部( $z: 10 \sim 15$  m)で構成される。要素間隔は、 $x$ 方向5 m、 $y$ 方向6 m、 $z$ 方向は基礎地盤部0.25 m、堤体部1 mとした。解析条件として、 $y = 96$  m地点を水位変動境界に設定し、水位上昇による定常状態解析を実施した。堤体部の透水係数は $k = 5.58 \cdot 10^{-8}$  m/sで一定とし、基礎地盤には前章で得られた透水係数分布を適用した。また比較のため、基礎地盤の透水係数を一定値 $k = 1 \cdot 10^{-5}$  m/sとした均質モデルでも同様の解析を行った。

図-3には浸透流解析結果の動水勾配( $i = 0.5$ )超過確率分布を示す。条件付きシミュレーションによる透水係数分布を用いた不均質モデルでは連続的な値を取り、堤体上流側斜面付近で最大 10 %程度の超過確率を示す局所的にパイピングポテンシャルの高い部分が出現し、高確率の部分が上流から下流まで連続している。一方、均質モデルでは二値的分布となり、高確率部分が上流から下流まで連続する現象は見られない。

### 4. 結論

本研究では、CPTu から推定された透水係数を基に、GPR による条件付きシミュレーションを用いて基礎地盤の透水係数の空間分布を確率論的に表現し、パイピングポテンシャルの評価を行った。透水係数分布の不均質性が浸透流パターンに大きく影響し、均質モデルでは実際のパイピングリスクを適切に評価できない可能性が示された。提案手法により、限られた調査データから地盤の不均質性を考慮したパイピングリスク評価が可能となり、局所的にパイピングリスクが高い場所を定量的に特定できることが確認された。

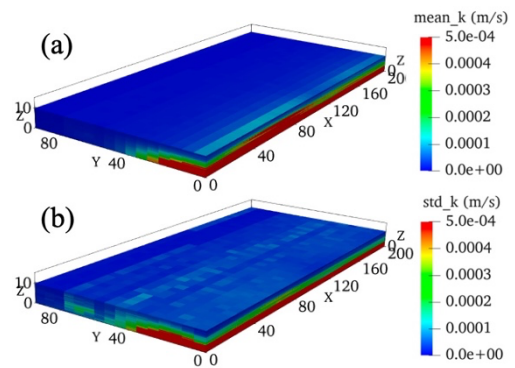


図-1 透水係数の平均(a)と標準偏差(b)分布  
(Fig. 1 Distribution of mean (a) and standard deviation (b) of permeability)

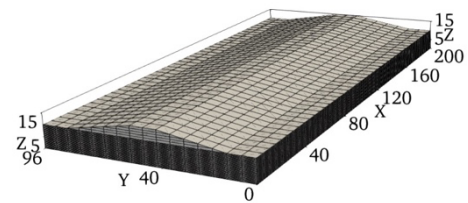


図-2 有限要素モデル  
(Fig. 2 Finite element model)

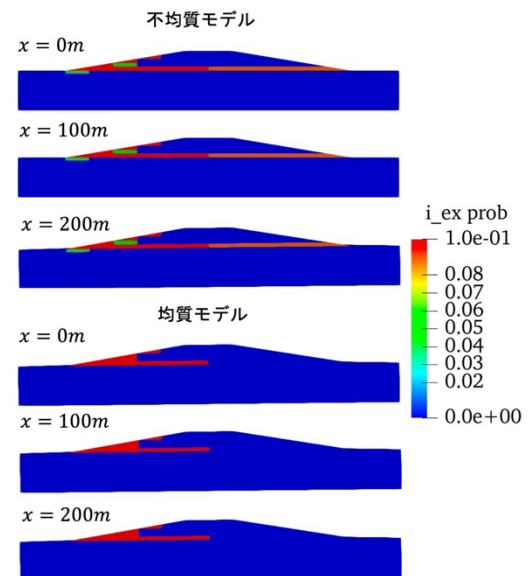


図-3 両モデルの動水勾配の臨界値超過確率  
(Fig. 3 Exceedance probability of critical hydraulic gradient for both models)