

河川堤防のリスクアセスメントへ向けた認識論的不確実性の定量化

新潟大学 学生会員 ○小出 央人
 新潟大学 正会員 大竹 雄

1. 研究の背景と目的

近年、透水性基礎地盤に起因する河川堤防の破堤や変状事例が報告され、メカニズムや危険性の高い土層構成が特定されつつある。しかしながら、基礎地盤の土層構成は水平距離が数 10m で大きく変化することもあり、長大な河川堤防の一般的な地盤調査間隔では、危険箇所を見落とししてしまう可能性が高い。

そこで本研究では、情報の不確実性に着目し、パイピング発生が懸念される土層構成の“見落としリスク”を定量化するための方法の構築に挑んでいる。このことは、様々な不確実性を含有する河川堤防リスク全体から、地盤調査の数や位置に応じた認識論的不確実性を分類することを意味しており、地盤調査の最適化の議論など、合理的な意思決定プロセスを支援する重要な情報となる可能性がある。

2. 土層構成のモデル化

土層構成のモデル化には Li et al.(2016)¹⁾が提案する Coupled Markov Chain(以下 CMC と呼称)モデルを用いる。基本的な考え方を以下に示す。

図 2 は、CMC モデルにおける地層推定の概念図である。CMC によって推定される領域は、同一サイズのセルによって離散化されることが前提となる。

セル(i, j)は、セル(i, j-1), セル(i-1, j), セル(N_x, j)に依存するものとする。また、推定領域の最左列, 最右列, 最上行のセルは、事前調査により既知であるとの条件により、セル(i, j)のある土質区分の存在確率は式(1)により記述される。

$$P_{lr,k|q} = \frac{P_{lk}^h P_{kq}^{h(N_x-1)} P_{rk}^v}{\sum_{f=1}^m P_{lf}^h P_{fq}^{h(N_x-1)} P_{rf}^v} \quad (1)$$

ここで、P_{lr,k|q}は、セル(i, j-1), セル(i-1, j), セル(N_x, j)の土質区分がそれぞれS_l, S_r, S_fである場合に、セル(i, j)の土質がS_kである確率を意味している。

なお、対象領域固有の情報で、P^v, P^hは鉛直遷移確率行列と水平遷移確率行列を意味している。そして、P_{rk}^v(P_{rf}^v)とP_{lk}^h(P_{lf}^h)はそれぞれの遷移確率行列の要素に対応しており、f, mは対象領域で発生が想定される土層の種類とその数を表している。P_{kq}^{h(N_x-1)}(P_{fq}^{h(N_x-1)})は}}}}}}

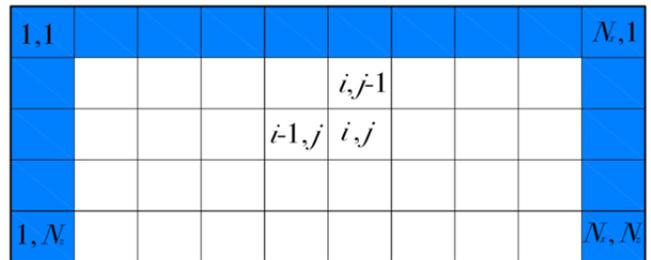


図 2 CMC モデルに用いるセル領域

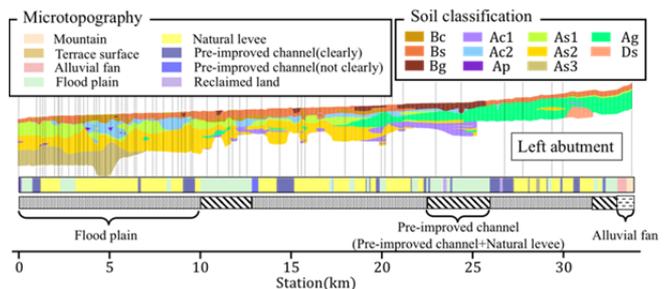


図 1 遷移確率行列の推定に用いる1級河川の地質縦断面図

N_x - 1回の遷移回数における S_k(S_f)からS_qへ遷移する確率である。従って、適切に解析を行うためには、対象領域固有の情報であるP^v, P^hを設定することが求められる。P^v, P^hはそれぞれ(2)式に示すように、土質S_iからS_jに続く遷移数をS_iからの遷移の総数で除することで単純に計算する方法である。

$$P_{ij} = \frac{T_{ij}}{\sum_{f=1}^m T_{if}} \quad (2)$$

ここで、T_{ij}(T_{if})は土質S_iからS_j(S_f)に遷移を観測された数である。本研究では、実河川堤防の地盤調査データに基づいて、鉛直・水平遷移確率行列P^v, P^hを設定する。図 1 は対象河川堤防の地質縦断面図である。これをもとに鉛直方向は 0.2m, 水平方向は 50m 間隔でメッシュ分割を行い、メッシュ毎に土質区分を読み取った。

3. 認識論的不確実性の分離

パイピング危険度評価には、オランダで用いられているパイピング判定モデル(Schweckendiek.T,2014)²⁾を用いる。紙面の都合上詳細は省略するが、地盤の空間的ばらつきを考慮して、確率密度分布を設定し、モンテカルロシミュレーション(以下 MCS と呼称)により計算を行う。

認識論的不確実性の分離には、MCS における感度係数算出法を用いる。本研究では、考慮する不確実性を(a)調査の多寡に影響する統計的推定誤差、(b)地盤パラメータの空間的ばらつき、(c)モデルにおける誤差の3つと仮定し、(a)を認識論的不確実性 α_{Ale}^2 、(b),(c)を偶然による不確実性 α_{Epi}^2 とおき、それぞれの寄与度を算出する。

$$\alpha_{Ale}^2 = 1 - \frac{\beta^2}{\beta_{-Ale}^2} \quad (4)$$

$$\alpha_{Epi}^2 = 1 - \alpha_{Ale}^2 \quad (5)$$

ここで β^2 は MCS により全ての変数を考慮した時の信頼性指標を示し、 β_{-Ale}^2 は信頼性解析における、パイピング照査式の変数を全て確定変数(分散0)とした場合の信頼性指標を示している。これによって選択した変数の不確実性が全体の性能に与える効果を間接的に求めることができる。

4. 簡易な例題に基づく試算

4.1. 問題設定

簡易な問題設定に基づいて、パイピングによる破壊確率と限界水位に着目した、見落としリスクの定量化、さらには合理的な意思決定への誘導を考える。

図3のような500m間隔で3本のボーリング調査(bor1, bor2, bor3)が実施された現場を想定する。また、表1には(2)式より求めた遷移確率行列を示す。紙面の都合上、Section1のみの結果を示す。

4.2. 計算の手順

STEP-1: 仮想土層領域の推定

事前に設定した遷移確率行列(表1)を用いて、CMCモデルによる仮想土層領域(以後 CMC場)のある1つの場 $R_i(i = 1, 2, \dots, N)$ を生成する(図4上段図)。

STEP-2: 破壊確率と限界水位の計算

得られた CMC 場の各断面に対して、破壊確率と限界水位 $H_c(m)$ を計算する。破壊確率は、限界水位より洪水水位が上回る確率 $P(F | R_i)$ となり、ある生成された場(R_i)における条件付き確率となる。(6)式

$$P(F | R_i) \approx \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n I[Z_{uij} \leq 0 \cap Z_{hij} \leq 0 \cap Z_{pij} \leq 0] \quad (6)$$

STEP-3: 見落としリスクの定量化と不確実性の分離

STEP-1 と STEP-2 を N 回繰り返し計算し、見落としリスクの定量化と不確実性の分離を試みる。まず破壊確率の全確率は、CMC場の発生確率が $P(R_i) = 1/N$ であることから、 N 回の CMC 場生成における破壊確率の期待値を計算することに等価と考えられ、次式で与えられる。

$$P(F) = P(F | R_i)P(R_i) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^n I[Z_{uij} \leq 0 \cap Z_{hij} \leq 0 \cap Z_{pij} \leq 0] \quad (7)$$

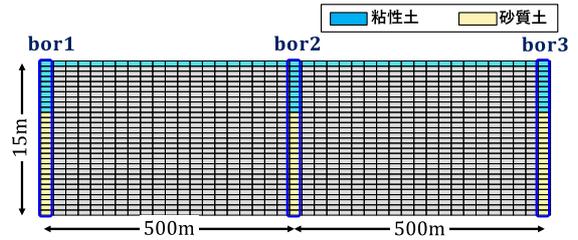


図3 CMCモデル推定に用いるボーリング柱状図

表1 実データより求めた区間1の遷移確率行列

soil type	鉛直遷移確率行列			水平遷移確率行列 (下流から上流)			水平遷移確率行列 (上流から下流)		
	clay	sand	gravel	clay	sand	gravel	clay	sand	gravel
clay	0.927	0.073	0.000	0.904	0.092	0.004	0.895	0.102	0.003
sand	0.013	0.982	0.005	0.040	0.959	0.001	0.036	0.962	0.002
gravel	0.175	0.000	0.825	0.033	0.045	0.922	0.045	0.033	0.922

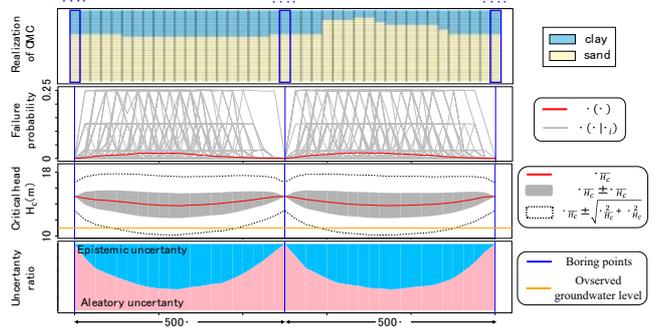


図4 Section1の試算結果

4.3. 計算結果と考察

図4, 2,3段目にはそれぞれ、パイピング破壊確率と限界水位の分布が示されている。約250mと750m地点でパイピングの危険性が高いことが分かる。それに伴い、図4, 最下段の図では、不確実性の寄与度が示されているが、認識論的不確実性の寄与度が調査点から遠ざかるほど、増加傾向にあり、追加調査の必要性が示唆される。これらより、見落としリスクを定量的に評価し、認識論的不確実性を分離、計量することで、追加調査等の合理的な意思決定へ誘導できることを示した。

5. 今後の展望

今後は、遷移確率行列の設定方法について詳細な分析を行い、CMCの予測精度の向上や、信頼性解析による見落としリスクの定量化に加え、VOIを考慮した観測点の最適化や大規模災害を抑制するためのマネジメント手法の提案へとつなげていきたいと考えている。

参考文献

- 1) Xiao-Hui Qi., Dian-Qing Li., Kok-Kwang Phoon., Zi-jun Cao. and Xiao-Song Tang.: Simulation of geologic uncertainty using coupled Markov chain. Engineering Geology, Engineering Geology. 207, pp.129-140, 2016.
- 2) Timo SCHWECKENDIEK.: On reducing piping uncertainties a Bayesian decision approach. TU Delft, 2014.