

ハザード解析と堤防信頼性解析を融合した 洪水リスク解析法の開発

新潟大学 大竹 雄

岐阜大学 本城勇介

株式会社建設技術研究所 根本 徹

株式会社建設技術研究所 阿左美 敏和

概要：

本研究は、河川堤防の質的評価と量的評価を考慮した実用的な洪水リスク解析法の開発とフィージビリティスタディである。ある実河川堤防（一級河川）を対象として、実データに即して、実務上の課題を克服しながら一連のモデル開発を行うとともにその手順を示すことを目的としている。本原稿では、提案するリスク解析方法の概要を示すとともに、今年度開発を行った、地盤調査地点間の推定誤差（見落としリスク）の定量化方法について詳述している。これは、中小河川等において、十分に洪水履歴等の情報が不足している場合を想定して、階層ベイズ法を用いて、計算点（地盤調査点）間の効果的に内挿推定する方法を提示している。

キーワード：河川堤防, パイピング, 洪水リスク解析, 階層ベイズ法

1. 研究の背景と目的

社会基盤への公共投資が限られる中、公共投資にかかわる種々のリスクを評価し、整備の実施規模、優先順位決定等を合理的に定めることが求められている。申請者らは、上記の問題意識に基づいて、平成 26—27 年度の本研究助成の支援を受けて、河川堤防（質の評価）の信頼性解析法の開発を精力的に進めてきた。本研究では、これらの研究成果を実用的なリスク評価モデルへ拡張することを目的とする。

具体的には、信頼性解析およびリスク解析の専門家と河川工学分野の専門家との共同研究体制に基づいて、「①洪水ハザード解析」、「②堤防の信頼性解析」、「③氾濫解析」をシームレスに取り扱うことができる「洪水リスク解析モデルの開発」を目指した。

本原稿では、提案するリスク評価モデル全体について、その概要を示すとともに、今年度研究開発を行った、階層ベイズ法を用いた調査地点間の合理的な内挿推定方法とその精度の定量化方法を提示する。地盤調査の多寡を信頼性解析およびリスク評価へ考慮するための方法であり、地盤調査地点の最適化を含めて、多様な意思決定問題へつなげることができるモデルを開発した。

2. 提案解析法の基本的な考え方

実堤防のデータを利用しているため、対象堤防の詳細については記載できないため、対象とする河川堤防やデータに関する記述は省き、提案手法部分について記述する。

(1)透水性基礎地盤に起因する堤防破壊のモデル化

Schweckendiek.T(2014)¹⁾が提案するモデルによって検討を行う。Schweckendiek.Tは、パイピング破壊が Uplift（盤ぶくれ）、Heave（クイックサンド）、Piping（水みちの形成）の 3 つの限界状態に対して照査を行い、それらは並列システムをなすものとしている。照査に用いられる性能関数を次に示す。

$$Z_u = g_u(x) = m_u i_{c,u} - m_\phi i \quad (1)$$

$$Z_h = g_h(x) = i_{c,h} - \min \{i, i_{c,u}\} \quad (2)$$

$$Z_p = g_p(x) = m_p H_{c,p} - m_\phi i \quad (3)$$

ここに m_u , m_ϕ , m_p はそれぞれのモデル係数、 i は局所動水勾配、 $i_{c,u}$, $i_{c,h}$ は Uplift, Heave の限界動水勾配、 $H_{c,p}$ は Piping の限界水頭差、 H は河川側と堤内地側との水頭差である。

$$F_{sys,p} = F_u \cap F_h \cap F_p$$

$$= Z_u(\mathbf{X}) < 0 \cap Z_h(\mathbf{X}) < 0 \cap Z_p(\mathbf{X}) < 0 \quad (4)$$

それぞれの性能関数が負になる場合を破壊 (F_u, F_h, F_p) と提示すると、透水性基礎地盤に起因する破壊は上式で表現することができる。 $\mathbf{X}$ は基本変数ベクトルである。浸透すべり破壊の照査には、Otake et al.(2015)²⁾が提案する応答曲面式を用いる。浸透すべり破壊の照査に用いる性能関数 Z_{stp} を次に示す。

$$Z_{stp} = F_s - 1 \quad (5)$$

$$\begin{aligned} F_s = & 1.382 + 0.066 \cdot \phi' - 0.030 \cdot k_e / k_b \\ & - 0.161 \cdot \alpha_{toe} - 0.081 \cdot \alpha_{hyd} \\ & + 0.027 \cdot \alpha_{toe} \cdot \alpha_{hyd} \\ & - 0.049 \cdot H_{wal} + 0.044 \cdot \alpha_{toe} \cdot H_{wal} \\ & + 0.125 \cdot H_{wal} \cdot B_{toe} - 0.085 \cdot \Delta H \end{aligned}$$

ここに、 F_s は円弧すべり安全率、 ϕ' は堤体土の内部摩擦角、 k_e, k_b は堤体と基礎の透水係数、 α_{toe} は法尻勾配、 α_{hyd} は平均動水勾配、 H_{all} は堤防高、 B_{toe} は法尻幅、 B_{all} は堤防幅、 H_{wal} は擁壁高、 ΔH は堤内地と河川の水位差である。浸透すべり破壊確率を PF_{sp} と記述する。

越水の照査は、堤防高 $h_d(m)$ と河川水位 $h(m)$ の比較により単純に下式で評価を行うこととした。越水の照査に用いる性能関数 Z_o を次に示す。

$$Z_o = h_d - h \quad (6)$$

この仮定は、越水することに対する破壊確率であり、堤防の破壊確率を意味するものではない。この後、改善が必要であると考えている。越水破壊確率を PF_{op} と記述する。

(2)洪水外力のモデル化

現本研究では、全確率による評価を行うために各破壊モードの照査に用いられる河川水位 h の頻度分布のモデル化を行う。ここでは、対象河の降雨強度の再現期間と流量の関係に基づいて 200m 毎の照査点の水位 h の頻度分布を Weibull 分布でモデル化を試みる。次に年超過確率 P_I と河川水位 h の関係を示す。

$$P_I[X \geq x_t] = 1 - \exp(-(h/\eta))^m \quad (7)$$

ここで、 m, η はモデルパラメータである。

(3)破壊確率の計算方法

本研究では、対象とする 3 つの破壊モードのいずれかが発生した場合に破壊に至る、つまり各破壊モードの和事象をとること、破壊確率 $P(F)$ は次式で示す。

$$F = F_{sys.p} \cup F_{stp} \cup F_o \quad (8)$$

$$= Z_o(X) < 0 \cup Z_{stp}(X) < 0$$

$$\cup Z_u(X) < 0 \cap Z_h(X) < 0 \cap Z_p(X) < 0$$

$$P(F) = \frac{\sum I[F_j]}{N} \quad (9)$$

ここで、 $F_{sys.p}$ は透水性基礎地盤に起因する破壊、 F_{stp} は浸透すべり破壊、 F_o は透水性基礎地盤に起因する破壊、 $I[\cdot]$ はインジケータ関数を表す。

従って、破壊確率 $P(F)$ はモンテカルロ・シミュレーション（以降、MCS と記述する）により、次式によって算出することができる。また、破壊モード m の寄与度 CT_m を次式で定義する。

$$CT_m = P(F_m) / (P(F_o) + P(F_{stp}) + P(F_{sys.p})) \quad (10)$$

(4)洪水履歴（痕跡）による破壊確率の更新

観測情報 ε が得られた場合の基本変数 $\mathbf{X}$ の事後分布（確率密度関数） $f(\mathbf{X}|\varepsilon)$ は、ベイズの定理により次のように表される。

$$f(\mathbf{X}|\varepsilon) = \frac{P(\mathbf{X}|\varepsilon)/f(\mathbf{X})}{\int P(\mathbf{X}|\varepsilon)f(\mathbf{X})d\mathbf{X}} \propto kL(\mathbf{X})f(\mathbf{X}) \quad (11)$$

ここに、 $f(\mathbf{X})$ は基本変数 $\mathbf{X}$ の事前分布（確率密度関数）、 $L(\mathbf{X})$ は観測情報 ε が得られたときの $\mathbf{X}$ の尤度分布で、 $L(\mathbf{X}) = P(\varepsilon|\mathbf{X})$ である。ベイズの定理より事後分布は尤度分布と事前分布の積に比例することがわかる。

Schweckendiek.T(2014)は、事後確率と事後分布を推定する方法として、実装の簡便さから、「Direct Method」と呼ばれる方法を推奨している。Direct Method では、条件付き確率の定義より、観測情報 ε が得られたときの事後確率 $P(F|\varepsilon)$ は次式のようにになる。

$$P(F|\varepsilon) = P(F \cap \varepsilon) / P(\varepsilon) = \frac{P(g(\mathbf{X}) < 0 \cap h(\mathbf{X}) < 0)}{P(h(\mathbf{X}) < 0)} \quad (12)$$

ここに、 $g(\cdot)$ は性能関数、 $h(\cdot)$ は観測関数である。通常、Direct Method では、基本変数の確率分布を直接得ることはできないが、MCS では、観測関数を満たす粒子を抽出し、リサンプリングすることで、多数の粒子の集合により事後の確率密度分布を近似することができる。この方法は、粒子フィルタ（モンテカルロフィルタ）として知られる方法と同様の考え方である。以下に、変状に応じた観測情報 ε を示す。

a) 変状なし (No Seepage)

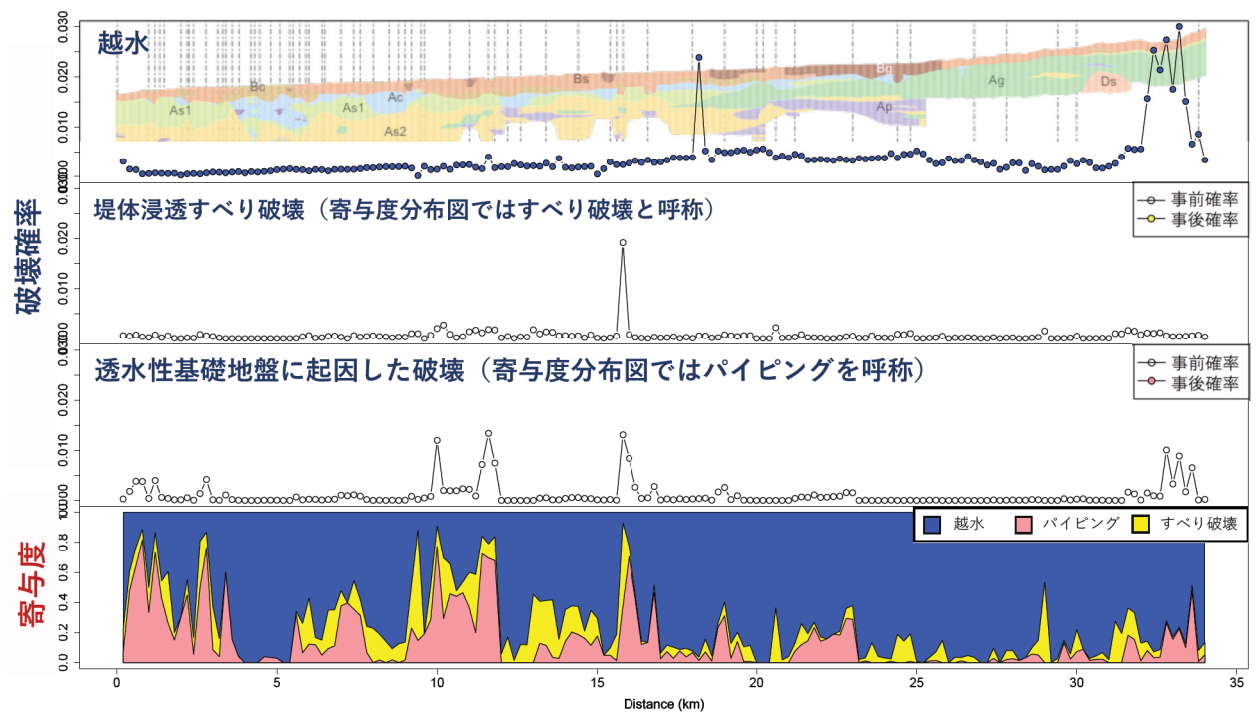
$$\varepsilon = \bar{F}_u^p | h_{obs} \quad (13)$$

ここに、 $\bar{F}_u^p$ は Uplift の性能関数が超過するという事象 F_u の余事象（Uplift の性能関数が超過しない）、上付き文字 p は過去の事象を表している。また、被覆土が存在しない場合には必ず漏水が起こるとする。

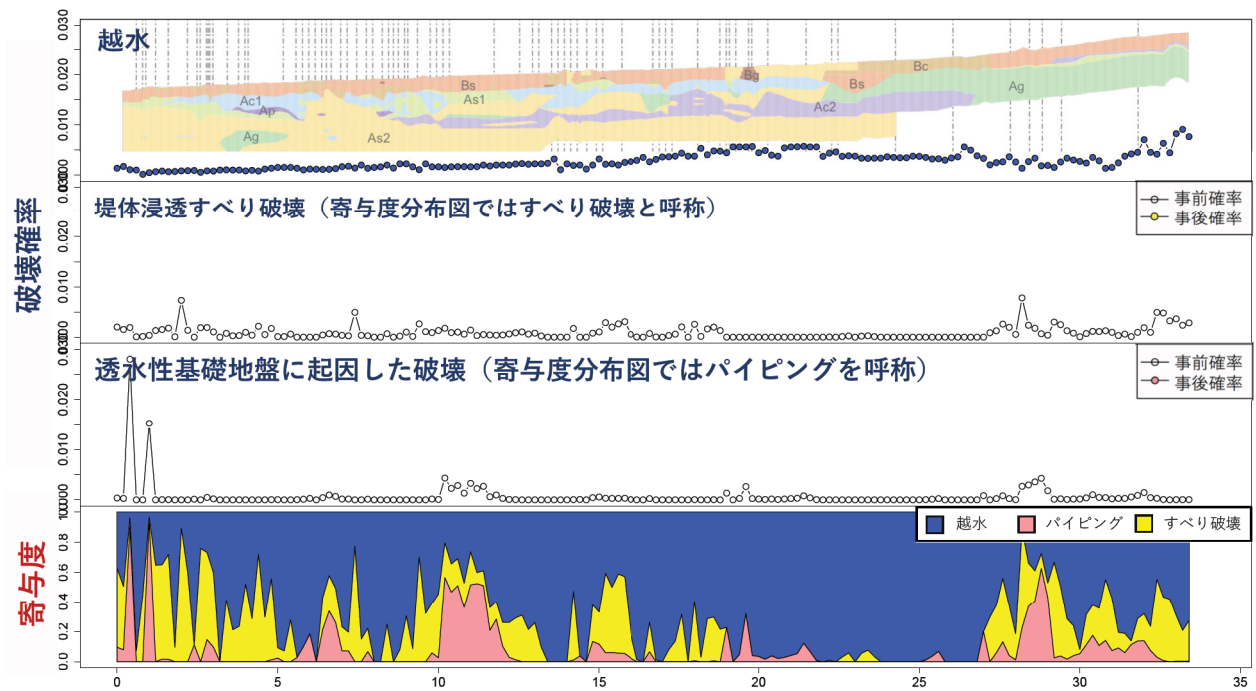
b) 漏水 (Seepage)

$$\varepsilon = F_u^p | h_{obs} \quad (14)$$

ここに、 F_u^p は Uplift の性能関数が超過しないという事象、上付き文字 p は過去の事象を表している。



(a) 対象河川堤防左岸の結果（既対策区間も未実施と仮定しているため、既に危険箇所は対策が行われている可能性がある。実際の安全性とは異なる。）



(b) 対象河川堤防右岸の結果（既対策区間も未実施と仮定しているため、既に危険箇所は対策が行われている可能性がある。実際の安全性とは異なる。）

図-1 一級河川堤防35kmへの適用結果

c) 噴砂 (Sand Boils)

$$\varepsilon = \{F_u^p \cap F_h^p\} | h_{obs} \quad (15)$$

ここに、 F_u^p 、 F_h^p はUplift, Heaveの性能関数が超過しないという事象、上付き文字 p は過去の事象を表している。

(5) リスク指標の計算方法

洪水経済調査マニュアル(案)(2005)³⁾に従って各確率規模における破堤時損失被害額の算出を二次元不定流解析により行った。事前にパラメトリックスタディー解析を行い、任意地点における確率規模ごとの損失被害額と流量の関係を間 k 連づけた。ここでは、ロジスティック回帰分析を採用している。

$$C_i = \frac{a}{1+b \times \exp(c \times Q_i)} \quad (16)$$

ここに、 C_j を任意地点の流量に応じた損失額、 Q_j を任意地点の流量である。期待洪水リスク R (単位)は、破堤に至った場合のみ損失が発生するとして、破堤に至った場合の被害額と破壊確率の積の期待値をとることで求められる。

$$R = \sum_j I[F_j] \times C_j / N \quad (17)$$

リスク $R=C \times P(F)$ とすると、損害額 C を次式で逆算することができる。

$$C = R / P(F) \quad (18)$$

(6) 解析結果

図1(a), (b)は、左岸および右岸の信頼性解析の結果の概要を整理した図である。この図は4つの図で構成されている。上から越水確率(背景に地質縦断面図)、堤体浸透すべり破壊(基礎地盤を含まない、本文中では単にすべりと表現する場合もある)、透水性基礎地盤に起因した破壊(本文中では単位パイピングと表現する場合もある)、崩壊形態の発生可能性(寄与度)が示されている。越水の危険性は、緩やかではあるが上流側にいくほど大きくなる傾向がある。相対的に下流側の安全余裕度が大きいことが分かる。堤体や基礎地盤に起因した危険度は、局所的に大きくなる傾向が読み取れる。

この計算結果を微地形分類図上にプロットしたところ、透水性基礎地盤に起因する破堤危険度が高い箇所は、旧可動部付近に位置する傾向があり、過去の被災頻出箇所を概ね捉えていることが分かった。現時点で公開できないため、図は省略する。

2. 階層ベイズ法を用いた調査点間の内挿

ここまで、比較的情報が蓄積されている1級河川を想定して、基本的なリスク解析法の提案を行ってきた。ここでは、中小河川堤防などでは、一級河川堤防よりも地盤調査がすくなく、また、過去の洪水の痕跡データも残

っていない場合もある。この場合には、数km程度の地盤調査間隔で河川堤防の線状のリスクを計算することが求められる。このような問題設定に基づいて、地盤調査が存在する地点で実施した信頼性解析同士を合理的に内挿する方法を提案する。また、内挿の推定誤差も定量化する。この誤差を申請者らは、見落としリスクと定義して、この誤差を信頼性解析に考慮し、地盤調査の最適化など、合理的な意思決定へつながる情報を取得することを目指している。

(1) 研究に用いるデータ

地盤調査以外に全ての区間で取得できる情報を用いて、効果的に内挿することを考える。このデータを本論文では、「環境条件データ」と呼称することにする。ある地点 i における環境条件データは、5種類設定し、 $\mathbf{z}_i = (z_{i,1}, z_{i,2}, \dots, z_{i,5})^T$ と記述する。全ての環境条件データは、下記の通り記述する。

$$\mathbf{Z} = \begin{pmatrix} | & | & | \\ \mathbf{z}_1 & \mathbf{z}_2 & \dots & \mathbf{z}_N \\ | & | & | \end{pmatrix} \quad (1)$$

ここで、 $\mathbf{z}_i$ 下付きの N は、河川堤防に沿った推定点の数を表す。地盤情報データは、一般的に基本的に離散データとして獲得されるものであるが、環境条件データは、全地点において獲得できるデータであり、このデータを活用して、離散的な地盤情報データを内挿できる可能性がある。ある地点 i における環境条件データは、下記の項目である。(a) $z_{i,1}$:堤体幅 $B(\text{m})$ 、(b) $z_{i,2}$:堤体の平均動水勾配 $\alpha(\text{m/s})$ 、(c) $z_{i,3}$:被覆土の層厚 $d(\text{m})$ 、(e) $z_{i,4}$:過去の中小規模洪水時の変状情報(変状あり:1, 変状なし:0)、(d) $z_{i,5}$:治水地形分類(旧河道区間:1, その他:0)である(図1(b))。 $z_{i,4}$ については、先の問題提起の通り、情報が取得できない可能性もあるが、説明変数としては残している。

(2) 検討に用いるモデル

下記に示す、3種類の手法を適用し、河川堤防の信頼性解析上の内挿推定に適したモデルを考察する。

(a) 手法1: Simple Kriging

調査点間の内挿には、一般的に用いられるKrigingを用いる。Krigingは、様々な手法が提案されているが、本研究では、Simple Krigingを用いる。Simple Krigingを採用した理由は、ベイズ推定として解釈することができるためである。手法2, 3では、階層ベイズモデルを適用することから、解析結果を比較しやすい手法を選定した。ここで、観測誤差は、計算点における信頼性解析から得られる限界水位の推定誤差を採用している。

(b) 手法2: ローカルレベルモデル

状態空間モデルとは、状態モデルと観測モデルと呼ばれる1組の方程式によって時系列が表現される統計モデルである。上でも述べたように、状態空間モデルは階層

ベイズモデルとして解釈できる。中でも本研究では状態空間モデルの 1 つとされる、ローカルレベルモデルを扱う。このモデルは次式で定義される。

$$x_i = x_{i-1} + v_i, \quad v_i \sim N(0, V) \quad (8)$$

$$y_i = x_i + w_i, \quad v_i \sim N(0, W) \quad (9)$$

ここで(8), (9)式はそれぞれ状態方程式と観測方程式であり, $\mathbf{X}(x_1, x_2, \dots, x_N)$ は状態ベクトルである。状態ベクトルは推定点数 N の次元のベクトルである。 $\mathbf{Y}(y_1, y_2, \dots, y_N)$ は観測ベクトルで、部分的に欠損（間引き、情報なし）している。 v_i と w_i はそれぞれ状態と観測のノイズで、系列内、系列間ともに独立で、それぞれ、平均 0、分散 V と W の正規分布に従うと仮定すると、状態ベクトル $\mathbf{X}(x_1, x_2, \dots, x_N)$ と観測ベクトル $\mathbf{Y}(y_1, y_2, \dots, y_N)$ は全て正規分布に従うことから、その仮定のもとでは、カルマンフィルタによって解が解析的に求められることが知られている。ノイズの分散 V と W は未知パラメータであり、カルマンフィルタと最尤推定法によって推定される。ノイズの分散を未知量としている点が、手法 1 との大きな違いである。

(c) 手法 3：ローカルレベル回帰モデル

手法 2 のローカルレベルモデルに環境条件データを慮する。状態方程式と観測方程式は下記の通りになる。

$$x_i = x_{i-1} + v_i, \quad v_i \sim N(0, V) \quad (10)$$

$$y_i = x_i + \beta z_i + w_i, \quad v_i \sim N(0, W) \quad (11)$$

ここで β と z_i は、それぞれ $\beta = (\beta_1, \dots, \beta_5)^t$, $z_i = (z_{i,1}, \dots, z_{i,5})^T$ で表され、環境条件データの回帰係数ベクトルと地点 i における環境条件データを示している。手法 2 のローカルレベルモデルとは観測方程式が異なっており、環境条件データにより、空間分布特性を補正することが目的である。ここでの未知パラメータは、各モデルのノイズの分散 V と W と、回帰係数の β 平均と分散である。この未知パラメータの推定は、MCMCを用いる。

(3)解析結果

50m 間隔で地盤情報が入手できた場合を想定して、先に示した信頼性解析を実施し、これを正解データとする。この正解データに対して、概ね 1km 間隔となるように間引きデータを作成し、この間引きデータで内挿し、正解データとの比較により、各内挿方法の特質を議論することにする。

(a)限界水位の内挿結果について

図-2(a)は、正解データにより計算された限界水位の空間分布と間引きデータから内挿した結果（中央値、50%、90%の信頼区間）が示されている。全ての手法で、間引きデータからの内挿の90%信頼区間に正解データが存在することが分かる。しかしながら、推定の中央値に着目すると、手法 1 よりも手法 2、手法 2 よりも手法 3 の方が、正解データのトレンドを捉えている事がわかる。特に、環境条件データの回帰分析を取り入れた手法 3 では、データない区間においても、正解データの空間変動特性

を適切に推定できている事がわかる。環境条件データは、堤防の表面の観測から分かる限られた情報ではあるが、堤防の危険度を推定する上で貴重なデータであることが分かる。

(b)信頼性指標の空間分布について

図-2(b)は、信頼性指標の空間分布が示されている。図中の緑色のハッチングは、ISO2394(2015)が定める目標信頼性指標の幅を示している。図中の点線は、正解データから計算した信頼性指標であり、実線が、間引きデータからそれぞれの手法により計算した信頼性指標を示している。正解データによる解析結果（点線）は、バラツキはあるもののその下限値がおおよそ ISO2394(2015)の標準値の範囲に入っている。実線は、内挿誤差をさらに考慮しているので、信頼性指標はさらに小さくなる傾向があるが、手法 1 では、全体として信頼性指標が小さくなる傾向があるのに対して、手法 2、3 では、正解データの信頼性指標の空間的変動特性を有したまま、さらに小さい値が得られていることが分かる。調査の不足による見落としリスクを適切にモデル化できていると考えられる。

(c)調査間隔と内挿誤差の関係について

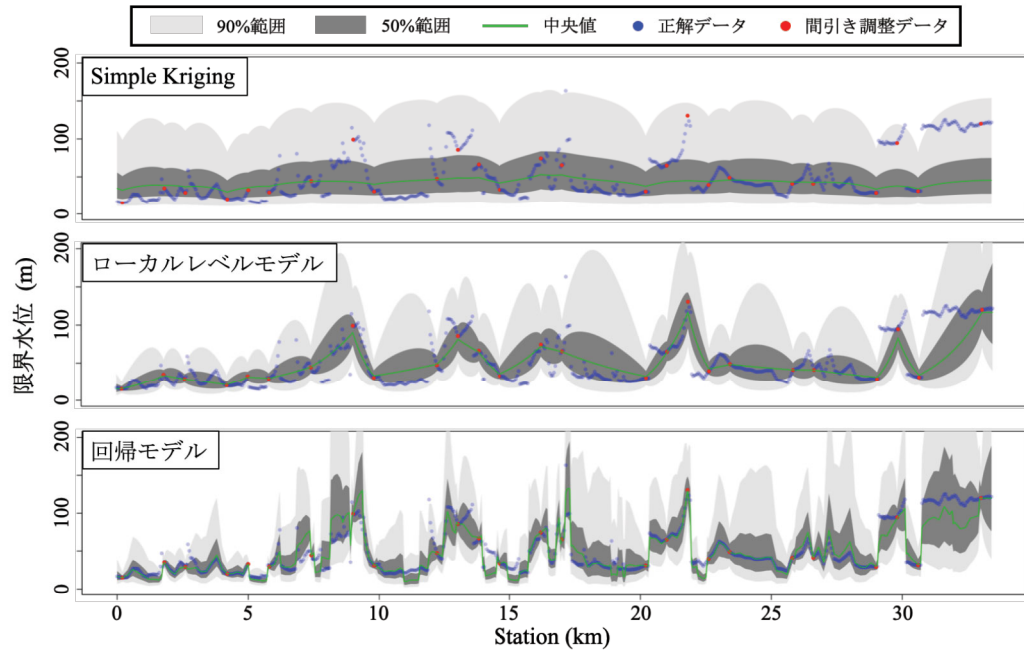
図-2(c)は、クロスバリデーションにより、地盤調査間隔と内挿誤差の関係を表した図である。内挿誤差は、対数尤度とバイアスの変動係数を指標としている。手法 3 の推定誤差が最も小さい事がわかる。さらに、全体的な傾向をみると、調査間隔 500m 以下の領域において、調査間隔が小さくなることにより、誤差の低減割合が大きい事がわかる。これらの解析結果を踏まえて、今後最適な調査間隔の議論を行うことが求められる。

4. まとめと今後の課題

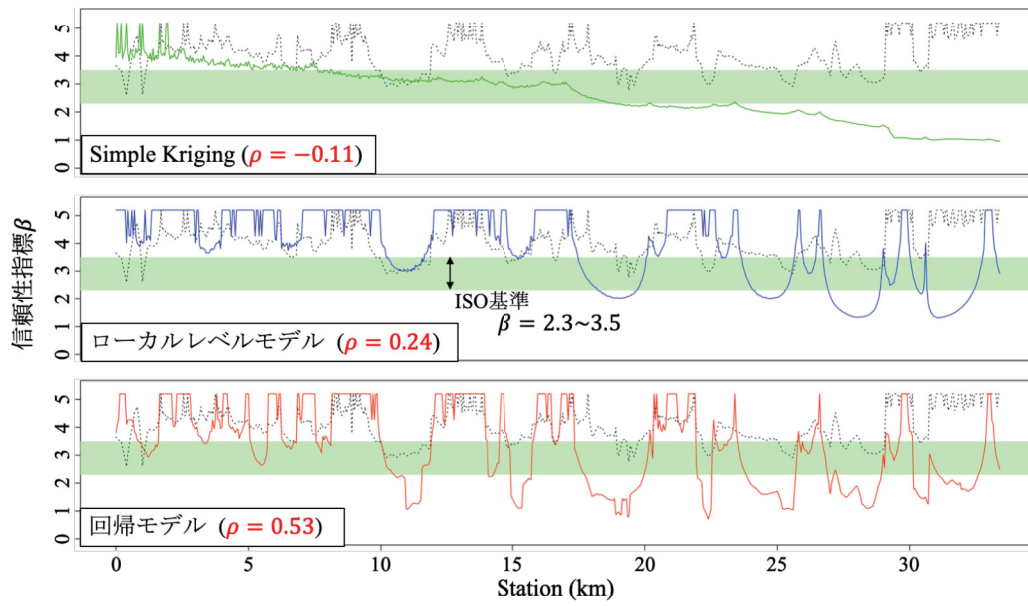
本研究では、申請者らが開発してきた信頼性解析理論を拡張し河川堤防のリスク評価モデルの提案を行った。部分的に簡便な仮定を導入しているものの、評価手法の大枠を提案した。実河川堤防への適用を通じて、河川管理者が有する情報（地盤調査、変状履歴、地質調査の経験等）に応じて、危険箇所を絞りこむために有効な方法であると考えられた。また、その危険箇所の優先順位、対策の方法（追加地盤調査、対策工の実施）を設定する上で、有効な情報を与えることが確認された。今後は、要素解析技術の改善とともに、施設管理者との議論を行いながら、実用化へ向けて改善を行っていく必要がある。

参考文献

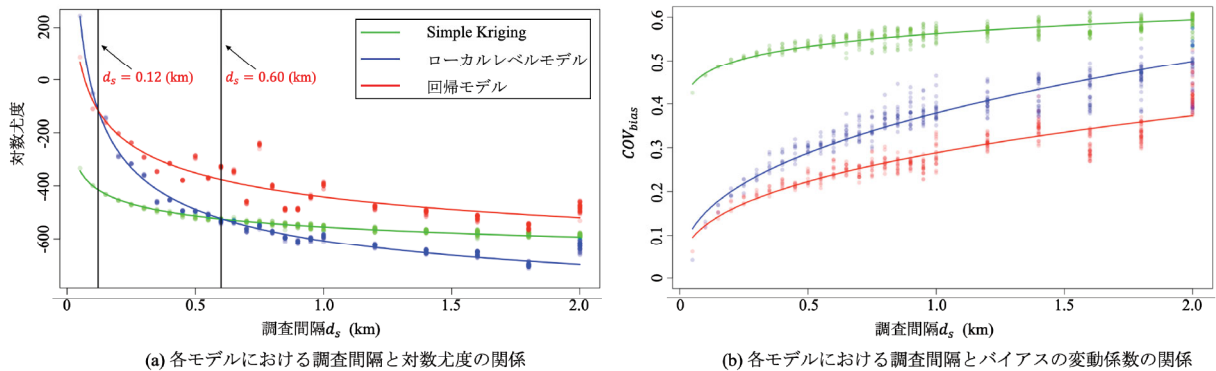
- 1) Timo SCHWECKENDIEK: On reducing piping uncertainties a Bayesian decision approach TU Delft, 2014.
- 2) Yu Otake, Y. Honjo, Y. Hiramatsu, K. Lee and T. Kodaka. Continuous River Levee Safety Assessment Based on a Reliability Analysis, Proc. of Geotechnical Safety and Risk V, T., Schweckendiek, A.F., van Tol, D. Pereboom, M.Th. van Staveren and P.M.C.B.M., Cools eds, pp.563-568, 2015.
- 3) 国土交通省河川局：治水経済調査マニュアル, 2005.



(a) 限界水位の内挿結果 (中央値, 50%信頼区間, 95%信頼区間)



(b) 対象河川堤防左岸の結果



(c) 調査間隔と内挿誤差の関係 (左図: 対数尤度, 右図: 変動係数)

図-2 解析結果