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 自然科学系 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における信頼性解析理論と量的評価における費用便益評価の融合による 実用的な洪水リスク解析法開発へ向けた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.さらに、リスクの観点から現状の河川管理の課題を明確にすることも重 要な課題と考えている.水理解析、地盤解析、経済損失額のそれぞれの計算が有する不確実性の寄与を分 析することにより、個別分野の議論ではなく、河川管理という大きな観点から、現状の課題を抽出したい と考えている.本成果は、本研究の1年目の成果であり、リスク解析手法の基本的な考え方を提示してい る.

キーワード: 河川堤防, パイピング, 洪水リスク解析, 意思決定問題

1. 研究の背景と目的

ている.

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 れらの研究成果を費用便益評価モデル、リスク評価モデル として実用化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」を目指す. ここで開発するモデルは、従来河川計画分野で行われてき た量的整備における費用便益評価の視点から見れば、質的 整備(堤防の信頼性)を考慮したモデルへの拡張である. すなわち、量的整備と質的整備のバランスのとれた整備計 画の立案を可能にするモデルの開発を目指すものである. 本論文は、本研究プロジェクトの1年目の成果をまとめ たものであり、リスク解析手法の基本的な考え方を提示し

2. 提案する解析法の基本的な考え方

(1)河川堤防の信頼性解析

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、提案手法部分について記述す る.

(a)透水性基礎地盤に起因する破壊

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.

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

$$Z_{h} = g_{h}(x) = i_{c,h} - \min\{i, i_{c,u}\}$$
(2)

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

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. $\begin{aligned} F_{sys.p} &= F_u \cap F_h \cap F_p \\ &= Z_u(\mathbf{X}) < 0 \cap Z_h(\mathbf{X}) < 0 \cap Z_p(\mathbf{X}) < 0 \\ 0 \quad (4) \end{aligned}$

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. 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、Otakeetal.(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.

$$Z_{slp} = F_s - 1 \tag{5}$$

$$\begin{split} F_{s} = & 1.382 + 0.066 \cdot \phi' - 0.030 \cdot ke \, / \, kb \\ & - 0.161 \cdot \alpha. toe - 0.081 \cdot \alpha. hyd \\ & + 0.027 \cdot \alpha. toe \cdot \alpha. hyd \\ & - 0.049 \cdot H. wal + 0.044 \cdot \alpha. toe \cdot H. wal \\ & + 0.125 \cdot H. wal \cdot B. toe - 0.085 \cdot \Delta H \end{split}$$

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, a.toe は法尻勾配, a.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 PE_{sp} と記述する.

(ç)越水

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。を次に示す.

$$Z_o = h_d - h \tag{6}$$

この仮定は、越水することに対する破壊確率であり、堤防 の破堤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 P₁ と河川水位 h の関係を示す.

 $P_1[X \ge x_t] = 1 - \exp(-(h/\eta))^m$ (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

発生した場合に破堤に至る、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.

$$F = F_{sys.p} \cup F_{slp} \cup F_o$$

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

$$\cup Z_u(X) < 0 \cap Z_h(X) < 0 \cap Z_p(X) < 0$$
(8)

$$P(F) = \frac{\sum_{j} I[F_j]}{N} \tag{9}$$

ここで、 F_{sysp} は透水性基礎地盤に起因する破壊、 F_{sp} 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、 $[[\cdot]$ はインジケーター関数を表す.

従って、破堤確率 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.

$$CT_m = P(F_m) / \left(P(F_o) + P(F_{slp}) + P(F_{sys,p}) \right)$$
(10)

(4) 洪水履歴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 X の事後分布(確 率密度関数) $f(X|\varepsilon)$ は、ベイズの定理により次のように表さ れる.

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

ここに、*f*(**X**)は基本変数 **X** の事前分布(確率密度関数), *L*(**X**)は観測情報 *e* が得られたときの **X** の尤度分布で, *L*(**X**)=*P*(*e*|**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 $P(F|\varepsilon)$ は次式のようになる.

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

ここに、g(・)は性能関数、h(・)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)

 $\varepsilon = \overline{F_u^p} |h_{obs} \tag{13}$

ここに、 \overline{F}_u 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)

$$\varepsilon = F_u^p | h_{obs}$$
 (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.

$$\begin{split} \varepsilon &= \{F_u^p \cap F_h^p\}|h_{obs} \end{split} \tag{15} \\ \text{ここに, } F_u^p, F_h^p & \text{it Uplift, Heave の性能関数が超過しない} \end{split}$$

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) 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.

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

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.

$$R = \sum_{i} I[F_i] \times C_i / N \tag{17}$$

リスク **R=C×P(F)**とすると,損害額 C を次式で逆算する事ができる。

$$C = R/P(F) \tag{18}$$

3. 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

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.

可能性(寄与度)が示されている.

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.

図2は、リスクマネジメントの分野で"リスクカーブ"と 呼称されている図で、対象施設のリスクの特徴の炙り出し、 対応策の策定を考えるたのえ基礎資料等に用いられる。こ れは、200m 間隔の計算点について、縦軸にトータルの破 壊確率、横軸に損失被害額(バックグラウンドリスク)を とった散布図である。ここでは、リスクRを破壊確率 P(F) ×損失被害額(C)として期待損失額として定義している ので、図中の点線のように等リスク線が表示できる.

リスク R = P(F)×C のため右上に行くほどリスクは大き くなる.河川堤防は長年,形状規定方式で管理されてきた ため,越水と浸透すべり破壊(形状に支配されている)は 同様な傾向を示しているのに対し,パイピング破壊は独立 した傾向を示している.

この河川堤防では、パイピングの崩壊パターンの断面を 優先的に対策を講じること、さらには、破壊確率が小さい が損失 C が大きい地点ほどリスクが大きい傾向があるこ とから、これらの箇所について対策を講じることが、河川 堤防全体の性能、リスクを効率的に低減するために有効な 対策順位であることが読み取れる.

図3は、対策優先度を具体的に設定してリスクの低減(ベネフィット)の変化を試算した例である.投資から5年経 過時を図化している.ここでは、3種類の試算ケースを想 定して年間35百万円の制限の範囲で対策を実施していく 仮定を計算した.

●ケース1(参考ケース): 確定的な評価, Uplift/Heave/ Slopeの照査のうち最も小さい安全率を代表安全率として, その値が小さいところから対策を行う. 同一の安全率があ った場合には河口に近い方を優先する.

●ケース2(Risk):本研究で計算したリスクを指標に,最 大リスクの地点から対策を行う.

●ケース 3(B/C):本研究で計算したリスクを指標に, B/C が最大の地点から対策を行う.

ここで、Bはベネフィットを表し、対策によるリスクの低 減をベネフィットと定義した.Cは対策費用である.なお、 対策方法は、試算の簡便化のため、緩勾配化対策を行うこ とを前提としている.用いた費用は、概算費用であり、問 題設定も単純化されたものである点に留意していただき たい.

4. まとめと今後の課題

本研究では、著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、危険個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、その危険個所の優先順位、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.
- 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) 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



河川全体への対策投資額 (百万円)

図-3 投資効果の分析例