

# 河川堤防の洪水リスクの定量化と対策意思決定の検討

新潟大学大学院自然科学研究科 学生会員 矢沢 大夢  
新潟大学自然科学系(工学部)建設学科 正会員 大竹 雄  
新潟大学大学院自然科学研究科 学生会員 小出 央人

## 1. はじめに

我が国の重要構造物の1つである河川堤防は、長年、形状規定方式の指針に基づき管理されてきた。しかし、平成24年の矢部川破堤は「越水なき破堤」とも呼ばれ、越水を伴わない透水性基礎地盤のパイピング破壊が要因とされている。この事例は河川管理者に大きな影響を与え、これまでの量的整備に加え、侵食や浸透等を考慮した質的整備の重要さが示唆された。

また海外の動向に着目すると、オランダ国では、VNK (Veiligheid Nederland in Kaart)プロジェクト(2016)<sup>1)</sup>と称する全国規模で越水破壊、すべり破壊、パイピング破壊の被災形態を考慮した解析を行い、洪水に関する経済的損失のリスクと死亡リスクを一般市民に公開している。

本研究では、実在する河川堤防を例題として、オランダ国の照査体系に基づく、危険箇所の抽出や効率的な対策優先度の決定手法を検討する。さらに被害損失額を考慮した危険度、即ちリスクに着目することで、危険度の視覚化やリスクに基づく意思決定方法の有用性について議論することを目的とする。

## 2. 研究の方法

### 2.1 各破壊形態を考慮した危険度の評価

#### 2.1.1 PIPING

Pipingの照査では、Schweckendiek.T<sup>1)</sup>が提案するパイピング破壊の信頼性更新モデルによって検討を行う。Schweckendiek.T<sup>1)</sup>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。

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

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

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

ここに  $m_u$ 、 $m_\phi$ 、 $m_p$  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。これらの性能関数に基づき、モンテカルロ・シミュレーション(以下、MCS)によって、破堤確率の算出を行う。また、このモデルは、ベイズ理論を用いて、観測された水位と変状の情報からパイピング破壊に対する河川堤防の信頼性を容易に更新が出来る。

#### 2.1.2 越水

越水の照査は、堤防高  $h_d$  (m) と河川水位  $h$  (m) の比較により評価を行う。越水の照査に用いる性能関数  $Z_o$  を次に示す。

$$Z_o = h_d - h \quad (4)$$

#### 2.1.3 浸透すべり破壊

浸透すべり破壊の照査には、平松ら<sup>3)</sup>が提案する応答局面式を用いる。浸透すべり破壊の照査に用いる性能関数  $Z_{slp}$  を次に示す。

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

$$\begin{aligned} F_s = & 1.382 + 0.066 \cdot \phi' - 0.030 \cdot k_e / k_b \\ & - 0.161 \cdot \alpha_{toe} - 0.081 \cdot \alpha_{hyd} \\ & + 0.027 \cdot \alpha_{toe} \cdot \alpha_{hyd} \\ & - 0.049 \cdot H_{wal} + 0.044 \cdot \alpha_{toe} \cdot H_{wal} \\ & + 0.125 \cdot H_{wal} \cdot B_{toe} - 0.085 \cdot \Delta H \end{aligned} \quad (6)$$

ここに、 $F_s$  は円弧すべり安全率、 $\phi'$  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、 $\alpha_{toe}$  は法尻勾配、 $\alpha_{hyd}$  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、 $\Delta H$  は堤内地と河川の水位差である。

## 2.2 破壊確率の算出

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により、破堤確率  $P(F)$  を算出する。

$$\begin{aligned} F &= F_o \cup F_{slp} \cup F_{sys. p} \\ &= Z_o(X) < 0 \cup Z_{slp}(X) < 0 \cup Z_u(X) < 0 \\ &\quad \cap Z_h(X) < 0 \cap Z_p(X) < 0 \end{aligned} \quad (7)$$

$$P(F) = \frac{\sum_j I[F_j]}{N} \quad (8)$$

ここで、 $I[F]$ はインジケータ関数を、 $N$ はモンテカルロシミュレーションで用いる粒子数を示す。

### 2.3 洪水リスクの算定方法

本解析では、洪水経済調査マニュアル(案)(2005)<sup>4)</sup>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行った。確率規模ごとの損失被害額と流量の関係は、ロジスティック回帰分析により、次式で定義した。

$$C_i = \frac{a}{1+b \times \exp(c \times Q_i)} \quad (9)$$

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。

$$R = \frac{\sum_j I[F_j] \times C_i}{N} \quad (10)$$

### 3. 結果と今後の課題

信頼性解析による連続的な破壊確率、寄与度の結果を図-1(a)(b)に示す。寄与度からわかるように、越水が破堤の主な要因であるが、被災履歴のある箇所、旧河道においてすべり破壊、パイピングの寄与度が大きい箇所は、破壊確率が高いことが示された。

図-2は、各照査地点における破壊確率とその地点が破堤した時の経済被害額を表している。このときの寄与度が大きい破壊モードで色分けを行っている。つまり、

どんな要因によってどれだけリスクを抱えているか明示している。

このように、任意地点の河川堤防が抱えるリスクを定量化した。今後は、空間的にリスクを算出することで対策、補修、遊水池の設置といった治水の判断材料となるようなシステムの構築を目指している。

### 参考文献

- 1) The National Flood Risk Analysis for the Netherlands, Rijkswaterstaat VNK Project Office, 2016
- 2) Schweckendiek T: On reducing piping uncertainties a Bayesian decision approach, TU Delft, 2014.
- 3) 平松佑一・本城勇介・大竹 雄・李 圭太・小高猛司: 堤地盤調査データの統計解析に基づく河川堤防の信頼性評価, 第1回地盤工学から見た堤防技術シンポジウム講演概要集, pp.49-50, 2013.
- 4) 国土交通省 河川局: 治水経済マニュアル(案), 2005.

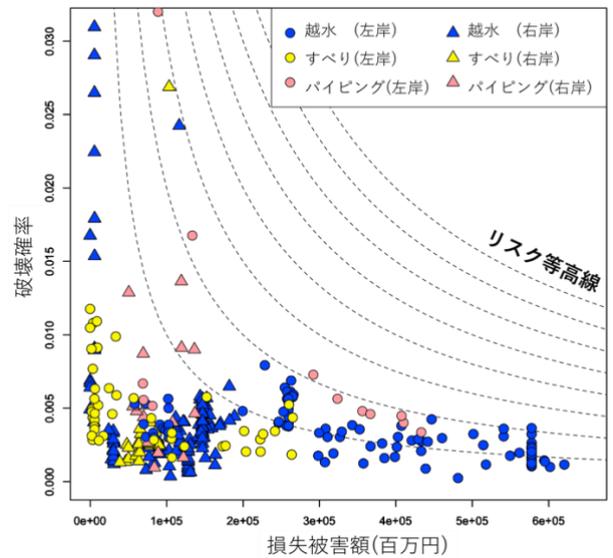


図-2 リスクカーブ

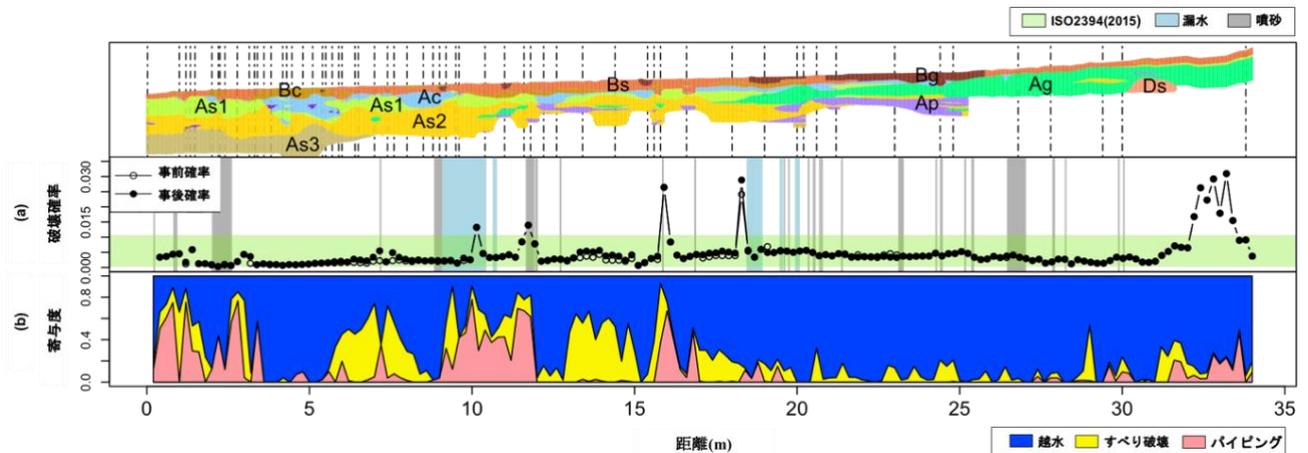


図-1 国内一級河川の信頼性解析結果 (35km)