

模型実験を援用した河川堤防の浸透破壊モード推定に向けた基礎研究 Fundamental study on characterization of river dike failure mode during flooding based on experimental observation

新潟大学大学院 学生会員 ○星野 溪太
新潟大学 正会員 大竹 雄
名城大学 正会員 小高 猛司
名城大学 正会員 李 圭太

1. 目的

我が国の重要構造物の一つである河川堤防は、連続した長大構造物であることから、上流から下流に至るまで一連のもの（システム）として、その安全性を検討する必要があると考えられる。さらには、堤防周辺の状況、経済被害の観点も設計、制御の重要な指標となると考えられる。しかしながら、現在の我が国における河川堤防の照査は堤防整備区間内、河道特性や洪水氾濫区域が類似する区間（一連区間）を設定し、その中で最も危険性が高いと想定される「代表断面」で数値解析を基本とした安全性評価が行われている。この照査では、耐力の大小を照査する方法であり、破壊モードを考慮した評価は行われていない。もし破壊モードを考慮した照査体系の構築が実現できれば、ダメージコントロールやレジリエンス¹⁾の概念を考慮した実用的な照査が可能となる可能性がある。

本研究ではその基礎的な位置づけとして、様々な条件で行われた模型実験結果から、統計解析を用いた破壊モードの類型化や堤体が変状に至る時間に着目して、脆弱性に関する分析を行う。具体的には、設計指標の主成分空間で、実験結果のクラスタリングの可否を検討する。

2. 研究方法

本研究では小高ら²⁾が行った模型実験結果(33Case)を用いた。それぞれの模型実験に対して、後述する照査を行い、照査指標の主成分分析を行なった。主成分分析とは多変量解析手法の一つで多数の説明変数から低次元の空間に情報を縮約する方法である。なお、円弧滑り計算では、最小安全率の探索時に、斜面上に与える通過点の違いにより3種類の計算(H, H/2, H/10)を行なっている。ここでHは、天端、H/2は、盛土高さの1/2、H/10は盛土高さの1/10に通過点を与えた場合を意味している。

図1は、模型実験の模式図を示している。模型実験では透水性が大きく異なる二層構造の基礎地盤を模擬し、堤体並びに基礎地盤の材料、境界条件（基礎地盤の層厚、行き止まりの有無、断面形状）を変えて計33Case行っている。

主成分分析に用いたパラメータはH/10すべり安全率:Fs1, H/2すべり安全率:Fs2, Hすべり安全率:Fs3, Uplift性能関数:Zu, Heave性能関数:Zh, Piping性能

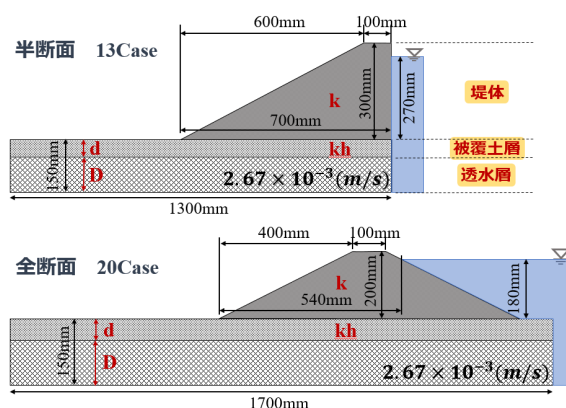


図1 浸透模型実験装置の概要

関数:Zpである。

なお、紙面の都合上、照査方法の詳細は割愛するが、各性能関数はオランダにおける照査式³⁾で算出している。以下にその式を示す。

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

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

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

ここに m_u , m_ϕ , m_p はそれぞれのモデル係数、 i は数値解析で算出した局所動水勾配、 $i_{c,u}$, $i_{c,h}$ はUplift, Heaveの限界動水勾配、 $H_{c,p}$ はPipingの限界水頭差である。

3. 研究結果

実験結果（変状パターン）は、小高ら²⁾により、図2の通り分類されている。これらは、堤体の透水係数と堤体下層の透水係数の差に関連づけられて考察されている。

パターン1は、粘性土堤体の場合で、堤防下層との透水生に明瞭な差異がある場合である。堤体に浸透が起これず狭義のパイピングによる進行性破壊にとどまり、堤体自体の変形は小さい。パターン2, パターン3ではパターン1に比べ透水係数の差はそれほど大きくない。そのため浸透により堤体の有効応力が低下し、基礎地盤を巻き込んだすべり破壊や沈下を引き起こす。これらは堤体の透水係数が比較的高い場合はすべり（パターン2）、低い場合には沈下（パターン3）に分類される。

キーワード 河川堤防, ダメージコントロール, 破壊モード, レジリエンス

連絡先 〒950-2181 新潟県新潟市西区五十嵐2の町8050番地 新潟大学大学院

主成分分析では固有値の寄与率から第二主成分まで採用することとした(第2主成分までで約78%)。図3は第一主成分と第二主成分の散布図を示している。また、矢印の向きのほうに各性能関数や安全率が低いことを表している。なお、図中の番号が実験につけた番号を示しており、赤字は堤体が崩壊に至った実験Caseを示している。この図より、先の変状パターンは、主成分空間で概ね分類できることが分かる。図の右側にパターン1がプロットされ、図の中心から左側にパターン2がプロットされ、パターン3は図の中心部にのみ存在する。図の中心部は、パターン2と3が混在して存在している。なお、その他は、堤体周辺に軽微な変状が見られた程度でパイプの形成や堤体の変状には至らなかったCaseを意味する。崩壊に至ったCase(図中の赤字)に着目すると、図の左側もしくは、図の中心に位置していることがわかる。

図4は、堤体(基礎地盤を除く)に変状が開始された時間(堤体変状開始時間と呼称)に応じて色を変えて図示しており、崩壊まで至ったもののみ菱形(◇)で示した。図の中心部から右側に堤体変状開始時間が短いCase(青色, 50s以下)がプロットされている。その内、約半数が崩壊まで至っており、崩壊に至るケースは図の中心部に位置している。図の左側には、堤体変状開始時間が比較的に長いCaseがプロットされている。これらのCaseは、堤体変状開始までの時間は遅いが、変状が起こると短時間に堤体崩壊まで変状が進行する傾向がある。

本研究では、設計や照査に良く用いられる単純な照査指標の主成分空間で実験結果の変状パターン进行分类できる可能性を示した。また、堤体変状開始時間と崩壊との関係性を分析したところ、堤防の脆弱性を図表的に区分できる可能性を確認した。

4. 今後の展望

今後は、多数の実河川堤防の照査結果を主成分空間で重ね合わせるにより、実河川堤防の現状モード、脆弱性の分類の可能性を検討する。その上で、主成分空間において、EMアルゴリズムなどにより、確率的にクラスタリングを行うことで、信頼性解析に反映させる方法を検討する予定である。

参考文献

- 1) 本田利器, 秋山充良, 片岡正次郎, 高橋良和, 野津厚, 室野剛隆: 「危機耐性」を考慮した耐震設計体系—試案構築に向けての考察—, 2016
- 2) 小高猛司, 李圭太, 野田利弘, 大竹雄, 本城勇介, 原忠, 溝口敦子, 小山倫史, 森口周二, 崔瑛: パイピングに伴う堤防劣化を考慮した河川堤防評価技術の開発(平成27年度河川砂防技術研究開発公募報告書), 2016
- 3) Schreckendiek.T: On Reducing Piping Uncertainties-A Bayesian Decision Approach-, TUDelft, 2014

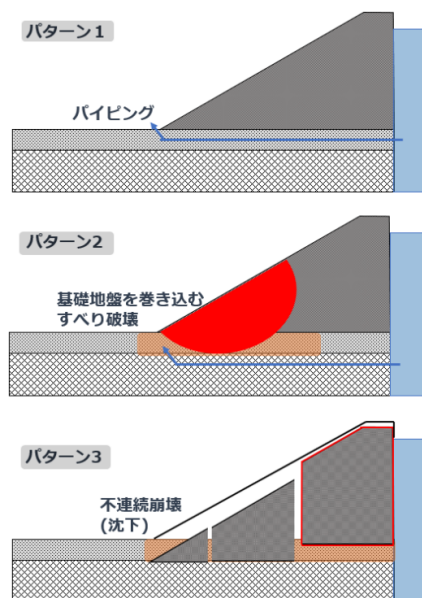


図2 変状モードの分類

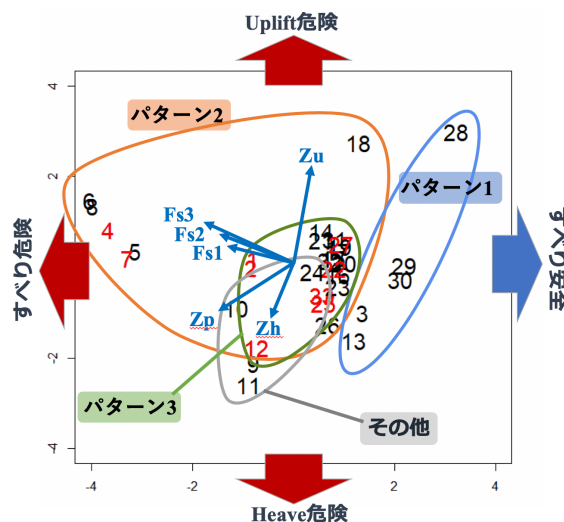


図3 主成分分析の結果
(図中の赤字は堤体が崩壊に至ったケースを表す)

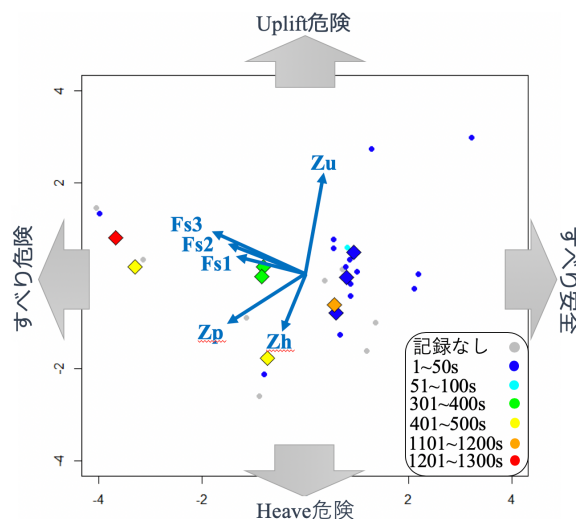


図4 堤体変状開始時間によって色分けした
主成分分析の結果
(菱形◇は崩壊に至った実験を表す)