

超過外力を考慮した河川堤防の設計体系の構築へ向けた基礎研究

Fundamental study of a design scheme for river dike safety assessment

considering unexpected external force

新潟大学大学院      学生会員    ○矢沢    大夢

新潟大学              正会員      大竹      雄

1. 背景と目的

1.1. 性能設計

欧米の主要な設計基準（AASHTO, Eurocode, ISO<sup>1)</sup>）は1990年代に性能設計へと移行している。我が国も、1995年にWTO/TBT協定に調印したことにより、国内規格から国際規格へ適用するため、仕様設計から性能設計への転換が求められている。性能設計の特徴として、構造物に要求される性能を満足すれば、材料、構造計算、施工方法は、自由に選択できる。ユーザー・規制者の視点、または、技術者の視点から見ることができ、誰にでも理解しやすい。また、安全性に加え、耐久性、美観、騒音といった性能を同一のコンセプトとして評価できるといった特徴が挙げられる。

1.2. 河川堤防の設計

港湾<sup>2)</sup>、道路<sup>3)</sup>において性能設計の導入が熱心に進められている。一方、河川堤防においては、性能設計の導入が遅れているのが現状である。これは、自然公物という特性がそのひとつの要因として挙げられる。なお、河川堤防も耐震機能のみ性能規定が進んでいるが、包括的な設計は行われていないと言えるであろう。

さらに、設計外力(H.W.L.)を超える災害を幾度となく経験してきた河川堤防は、安全性管理も難しく構造物としての信頼性は相対的に低いことが想定される。このため、河川堤防は、特に超過外力に対して致命的な状況に至らない設計(Beyond design)の重要性が指摘できる。これらを踏まえて、本研究は、河川堤防における超過外力を考慮した包括的な性能設計体系の枠組みづくりを目的とする。

河川堤防は、主に形状規定方式、土堤原則によって築かれてきた。そのため、質的な評価と設計の歴史は浅く、合理的な設計となっていない可能性もある。また、主にある断面に対する設計となっており、線状構造物としてシステムの信頼性を評価する考え方は導入されていない。堤防の断面耐力を大きくするのはもちろんだが、周辺地域への影響を最小するための観点、すなわち河川堤防のシステムとしての制御が可能となる設計体系が求められるであろう。また、越水しても、すぐには決壊に至らないような設計体系が必要不可欠であるであ

表-1 用語の定義

| 用語                                      | 定義                                                |
|-----------------------------------------|---------------------------------------------------|
| 設計（狭義）                                  | 設定された外力に対して安全性を担保                                 |
| リスクアセスメント                               | 極めて稀ではあるが想定される最大級の外力に対してリスクを最小化する設計               |
| PSA<br>(Probability Safety Assessment)  | ＜確率論的安全性評価＞<br>発生する可能性のある事象に対し、その発生の確率を考慮して安全性を評価 |
| 構造ロバスト性                                 | 局部的な破壊が構造システム全体に対して致命的な影響を及ぼさない                   |
| レジリエンス                                  | 様々な外力に対して“粘り強く耐える性質”として、強靱性、冗長性、機略性、迅速性を有する       |
| ダメージコントロール                              | 損傷が生じてでも致命的な状態に至らない破壊モードの制御                       |
| クライシスマネジメント                             | 迅速かつ適切な緊急対応による被害最小化、二次災害の抑制                       |
| 費用便益分析                                  | 構造物または部材の重要度に応じた適切な設備・対策へ投資                       |
| RIDM<br>(Risk informed decision making) | ＜リスク情報に基づいた意思決定＞<br>起こりうる事象の重要度、PRAに応じた安全性の意思決定   |

ろう。

表-1 に設計について述べる上で、重要な用語を定義した。この中で狭義の設計、リスクマネジメントは、我が国の設計の範囲内に該当する。構造ロバスト性、ダメージコントロール等は、破壊の状態を記述、制御するための概念であると捉えることができる。従って、性能設計の概念を照査し、実現するための信頼性解析においても従来とは異なる情報の提供が求められる。すなわち、単に破壊確率を計算するだけではなく、確率計算により得られる副次的な情報をいかに抽出し、情報提供し、RIDMを実装する必要がある。

以上を踏まえて、下記の3点が河川堤防の性能設計と信頼性設計を効果的に進める上で重要な視点であると考えられる。1) 河川堤防の特性を考慮した性能規定の提示、2) 河川堤防の線状構造物システムとしての照査方法、3) 超過外力による挙動の制御法（粘り強さ付与、ダメージ・コントロール）

2. 研究方法

本研究では、上記の着目点のうち、2) に着目する。

キーワード    河川堤防, 性能設計, 信頼性, リスクマネジメント

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

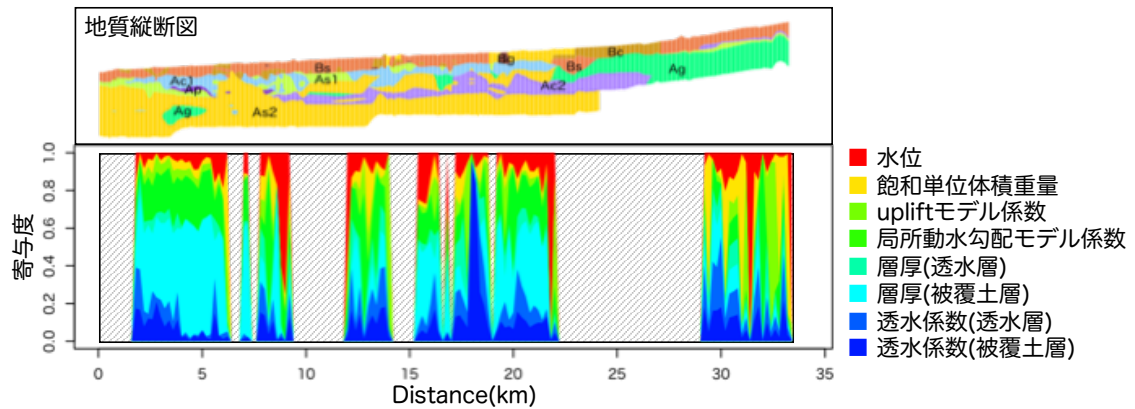


図-1 Uplift（盤ぶくれ）の感度分析

2) では、河川堤防全体のシステムとしての性能照査が要求される。具体的には、フレキシブルな設計制御を可能にするためのシステム破壊確率の定義と計算方法、河川堤防に沿った計算パラメータの感度分析が必要になると考えられる。ここでは、後者に着目して、その考え方と具体的な計算事例を示す。

著者らは、信頼性解析により、各破壊モードの確率計算を行ってきたが、確率の受け持つ意味を解釈のために、確率変数の感度分析（不確実性の定量化）を行う。特に、確率変数が多く、危険箇所の抽出が難しいパイピングについて感度分析を行う。以下に、Uplift(盤ぶくれ)、Heave(侵食開始)、Piping(水みちの形成)の性能関数 $g_u$ 、 $g_h$ 、 $g_p$ を示す。

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

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

$$g_p = m_p H_{c,p} - h \quad (3)$$

ここで、 $m_u$ はUpliftのモデル係数(-)、 $i_{c,u}$ はUpliftの限界動水勾配(-)、 $m_\phi$ は局所動水勾配モデル係数(-)、 $i$ は局所動水勾配(-)、 $i_{c,u}$ はHeaveの限界動水勾配(-)、 $m_p$ はPipingの限界動水勾配(-)、 $H_{c,p}$ はSellmeijer式に基づく限界水頭差(m)、 $h$ は河川水位(m)である。

感度計算は、古典的な信頼性解析に基づきながらも、煩雑な式から簡易に算出する方法を採用した。これにより、最終的に不確実性を知りたい変数を確定値として求めたときの信頼性指標 $\beta_{-i}$ 、計算に用いる全て変数を確率変数として求めたときの信頼性指標 $\beta$ のみから求めることができる。

$$\alpha_i^2 = \frac{\left(\frac{\partial g}{\partial x_i}\right)^2 \sigma_{x_i}^2}{\sigma_g^2} = \frac{\left(\frac{1}{\mu_g}\right)^2 \left(\frac{\partial g}{\partial x_i}\right)^2 \sigma_{x_i}^2}{\left(\frac{\sigma_g}{\mu_g}\right)^2}$$

$$= \frac{\left(\frac{1}{\mu_g}\right)^2 \sigma_g^2 \frac{\left(\frac{\partial g}{\partial x_i}\right)^2 \sigma_{x_i}^2}{\sigma_g^2}}{\left(\frac{\sigma_g}{\mu_g}\right)^2} = \frac{\left(\frac{\sigma_g}{\mu_g}\right)^2 \frac{\sigma_g^2 - \sigma_{g-i}^2}{\sigma_g^2}}{\left(\frac{\sigma_g}{\mu_g}\right)^2}$$

$$= \frac{\left(\frac{1}{\beta}\right)^2 - \left(\frac{1}{\beta_{-i}}\right)^2}{\left(\frac{1}{\beta}\right)^2} = \frac{\beta_{-i}^2 - \beta^2}{\beta_{-i}^2} = 1 - \frac{\beta^2}{\beta_{-i}^2} \quad (4)$$

ここで、 $g$ は性能関数、 $g_{-i}$ は性能関数(求めたい変数を確定値)、 $x_i$ は基本変数ベクトル、 $x^d$ は設計点である。

### 3. 結果と考察

書面の都合上、Upliftの感度分析の結果のみを図-1に示す。被覆土がない場合には、感度は求められないが、ある場合は、多くの区間が層厚、透水係数といった土層構成に起因していることが示された。Uplift(盤ぶくれ)は、被覆土の重量と揚圧力の差により照査を行うものであることから地盤工学的な観点と一致するような結果が見られた。このように、河川堤防に潜在している不確実性を定量化し、各破壊モードの解釈としても有用性がみられた。

### 4. まとめ

近年、我々の想像を上回る災害が頻発している中で、河川構造物は、特に信頼性の低い構造物である。また、地盤調査から得られる情報は限られているため、感度分析は、有用な情報となり得る。今後は、任意の地点の破壊モードを特定し、超過外力に対して延性的な破壊モードとなるようなツールの構築を目指している。

### 参考文献

- 1) ISO(2015):ISO2394,General principles on reliability for structures
- 2) 日本港湾協会 (2018):港湾の施設の技術上の基準・同解説(上・中・下)
- 3) 日本道路協会 (2017):道路橋示方書・同解説 I 共通編,丸善出版
- 4) 国土交通省 (2002):土木・建築にかかわる設計の基本
- 5) 本城勇介 (2004):地盤構造物の設計論と設計コード,土と基礎, Vol.52, No.12, pp.10-14.
- 6) 本城勇介,大竹雄 (2018):信頼性設計法と性能設計の理念と実際-地盤構造物を中心として,技報堂出版
- 7) 国土交通省水管理・国土保全局治水課 (2007):河川堤防設計指針
- 8) 国土交通省水管理・国土保全局治水課 (2015):河川砂防技術基準