

パイピング・盤ぶくれを考慮した 河川堤防の総合的な信頼性開発法の開発

新潟大学 自然科学系 大竹雄
岐阜大学 本城勇介

概要：

著者らは、河川堤防の信頼性解析法を開発するために継続的に研究を進めてきた。その特徴は、地盤調査の過不足さを考慮して河川堤防の信頼性を河川長手方向に連続的に評価する方法であり、これまで洪水（浸透）による堤体安定性評価、地震による液状化危険度評価を対象としてきた。

本研究では、これまで開発してきた解析モデルを、より局所的な現象が破壊を支配すると考えられるパイピングや盤ぶくれ現象を対象としたモデルへ拡張することを目的としている。まず、国内外の照査方法の分析整理からオランダ国の照査方法に着目して、信頼性解析体系を構築した。その上で、目視調査などの不完全情報を有効活用して、詳細調査の優先箇所や対策の優先順位を決定するための絞り込みの方法を検討した。高水の発生時や発生後には、堤防周辺の漏水、ガマの発生状況を確認することで、緊急的な応急対策の実施や長期的な対策優先度が検討される。しかし、目視から得られる情報は、不完全な情報であり、それに基づいて定量的に維持管理に取り組むことは困難であり、経験に委ねられていた。ここでは、信頼性解析に基づいて、それぞれの情報の不完全さを受け入れて、その不完全さに応じて、パイピング危険度を更新する方法を考える。河川堤防が有するリスクの“見える化”により合理的な堤防管理の可能性を探るものである。

キーワード：河川堤防、信頼性解析、パイピング、透水性基礎地盤

1. はじめに

著者らは、線状構造物である河川堤防の弱点部分を抽出することを目的として、種々の不確実性を考慮した安全性評価手法（信頼性解析）の確立を目指している。

まず、透水性基礎地盤に起因するパイピング破壊を対象としてオランダの照査基準（TAW,1999）¹⁾に着目し、モデル化誤差（計算法自体の誤差）、各計算パラメータの寄与度分析の観点から、日本国の河川堤防への適用性について検討する。

さらに、この基本的な考え方に基づいて、堤防管理において得られる様々な不完全な情報により、信頼性の更新を定量化することを試みる。河川堤防の管理においては、日常的に河川堤防を目視調査することが行われる。特に、高水の発生時や発生後には、堤防周辺の漏水、ガマの発生状況を確認することで、緊急的な応急対策の実施や長期的な対策優先度が検討される。しかし、目視から得られる情報は、不完全な情報であり、それに基づいて定量的に維持管理に取り組むことは困難であり、経験に委ねられていた。ここでは、信頼性解析に基づいて、

それぞれの情報の不完全さを受け入れて、その不完全さに応じて、パイピング危険度を更新する方法を考える。河川堤防が有するリスクの“見える化”により合理的な堤防管理の可能性を探るものである。

2. オランダ国における照査方法

オランダにおける河川堤防の照査では次に示す uplift, heave, piping の3つの破壊モードに関する照査を行う。ここで用いられるパラメータについては、表1に示す。この3つの破壊モードは並列システムとして扱われる。

(1) Uplift

Uplift の照査は堤防基礎地盤に被覆土層が存在する場合に行う。uplift の性能関数は、日本で盤ぶくれの照査用いられている照査式と同様に被覆土層の重量と透水層の上面に生じる間隙水圧との比較に基づいたものである。局所動水勾配 i は浸透流解析等によって算出する事ができるが、本研究では Dupuit の式をベースとした地下水流モデル²⁾を適用している。

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

$$i_{c,u} = \Delta\phi_{c,u}/d$$

$$\Delta\phi_{c,u} = d \frac{\gamma_{sat} - \gamma_w}{\gamma_w}$$

$$\phi_{exit} = h_p + \lambda(h - h_p)$$

$\Delta\phi_{c,u}[m]$ は限界水頭差である。局所動水勾配 i (被覆土層の浸出点の動水勾配) は次式で定義される。

$$i = (\phi_{exit} - h_p)/d = \lambda(h - h_p)/d$$

地下水流モデルより、減衰係数 λ は以下の式によって近似される。

$$\lambda = \frac{\lambda_h}{L_f + B + \lambda_h} \exp^{(B/2 - x_{exit})/\lambda_h}, \quad x_{exit} > B/2$$

$\lambda_h[m]$ は堤内地の「leakage factor」と呼ばれ、次式で与えられる。

$$\lambda_h = \sqrt{kDd/k_h}$$

(2) Heave

Uplift が粘着性のある透水性の低い被覆土層の亀裂に関するものである一方、heave は砂 (透水性材料) の侵食の始まりを考慮している。uplift の照査式と同様に局所動水勾配 i に基づいた検討を行っている。ここで、限界動水勾配 $i_{c,h}$ は、平均 0.7、標準偏差 0.1 の対数正規分布に従う。この確率分布は実験や実地調査に基づいたものである。次に性能関数 Z_h を示す。

$$Z_h = g_h(x) = i_{c,h} - i$$

なお、VNK2¹⁾では heave の限界状態は考慮されていないが、Timo²⁾は heave が並列システムに含まれるとしている。

(3) Piping

ここで「Piping」とは、透水性地盤において土粒子が移動して水みちが形成され、破壊に至ることを指す。その照査には、浸透経路長 L に関する式である Bligh の式や Lane の式を発展させた Sellmeijer を用いる。

$$Z_p = g_p(x) = m_p H_c - H = m_p H_c - (h - h_p - 0.3d) \quad \alpha_i = \frac{\left(\frac{\partial Z}{\partial X_i} \Big|_{X=X^*} \right) \sigma_{X_i}}{\left\{ \left(\frac{\partial Z}{\partial X_i} \Big|_{X=X^*} \right)^2 \sigma_{X_i}^2 \right\}^{1/2}}$$

限界水頭差 H_c は次の式で与えられる。

$$H_c = F_1 F_2 F_3 L$$

$$F_1 = \eta \left(\frac{\gamma_s}{\gamma_w} - 1 \right) \tan \theta$$

$$F_2 = \frac{d_{70}}{\sqrt[3]{\frac{vkL}{g}}} \left(\frac{d_{70}}{d_{70m}} \right)^{0.4}$$

$$F_3 = 0.91 \left(\frac{D}{L} \right)^{\frac{0.28}{(D/L)^{2.8} - 1} + 0.04}$$

$$L = L_f + x_{exit} + B$$

3. モデル化誤差の定量化と感度分析

日本国で用いられていない照査方法である Sellmeijer 式に着目して、そのモデル化誤差を定量化する。オランダと日本で実施された 25 の堤防パイピング実験結果収集し分析を行った。オランダの実験データには、小規模の模型実験から実物大規模の実験、実河川堤防を用いたデータも含まれている。

検証結果を図-1 に示す。この図は、実験から得られたパイピングの限界水頭差と計算から得られる限界水頭差の散布図を示している。左図は、限界水頭差 H_c そのものの関係を示し、右図は、 H_c を経路長 L で正規化した値で比較を行っている。

図中の赤プロットは日本国のデータでパイピングに至ったデータ、黒プロットはオランダ国データを示している。いずれも実験時にパイピングに至ったとの記述がある。青プロットは、パイピングに至らなかったケースであり、大きく外れる結果となっている。

パイピングに至ったデータのみに着目して、Sellmeijer 式のモデル化誤差を計算すると、bias=1.42 (実測値/計算値の平均)、COV=0.35 (実測値/計測値の変動係数) が得られた。大竹と本城(2014)³⁾は、日本国内で用いられている設計計算式のモデル化誤差を定量化し比較を行っている。これを見ると、力のつり合いに代表されるような古典的な設計計算法は、COV にして 0.3~0.4 程度誤差を含んでいるとしている。従って、本照査式は、設計計算法として許容できる程度の精度を有していると判断された。

次に、各計算パラメータの寄与度を確認するために、感度係数を算定した。感度係数は以下式で表され、設計点 X^* (限界状態面のうち最も破壊する可能性が高い点) まわりにおける性能関数の勾配とそれぞれのパラメータ分散値から計算される。

$$\alpha_i = \frac{\left(\frac{\partial Z}{\partial X_i} \Big|_{X=X^*} \right) \sigma_{X_i}}{\left\{ \left(\frac{\partial Z}{\partial X_i} \Big|_{X=X^*} \right)^2 \sigma_{X_i}^2 \right\}^{1/2}}$$

式の形から分かる通り、感度係数 α_i は荷重や材料特性値等の感度と不確実性の大きさを考慮した Index であり、基本変数 x_i が信頼性に与える寄与度を意味すると考えられる。感度係数 α_i は、技術者が次に何をすべきか (追加調査、対策工の設計) を考える上で重要な情報を提供すると考えられる。

表 1 基本変数一覧表

bol	単位	分布型	mean	sd	COV	Uplift	Heave	Piping
l	m	被覆土層厚さ	対数正規	2.90	$0.3 \mu_{dE}$	○	○	○
k	m/s	被覆土層の透水係数	対数正規	$1.00E-06$	$1.0 \mu_{dE}$	○	○	○
l	m	透水層厚さ	対数正規	20.0	$0.2 \mu_{dE}$	○	○	○
k	m/s	透水層の透水係数	対数正規	$3.40E-04$	$0.7 \mu_{dE}$	○	○	○
z	m	堤体幅	確定値	37		○	○	○
l	m	有効な堤外地の長さ	対数正規	10	2.4	○	○	○
l	m	堤体中央から浸出点までの距離	対数正規	30	0.5	○	○	○
l	m	河川水位	Gumbel	$a_n=1.364$	$b_n=5.747$	○	○	○
h	m	堤内地の浸潤面高さ	正規	0.3	0.1	○	○	○
u		upliftモデル係数	対数正規	1	0.1	○		
u		局所動水勾配モデル係数	対数正規	1	0.1	○		
γ_{sat}	kN/m ³	飽和単位体積重量	正規	23	3.5	○	○	
γ_w	kN/m ³	水の単位体積重量	確定値	10		○	○	○
γ_s	kN/m ³	土粒子の単位体積重量	確定値	26.5				○
β	deg	内部摩擦角	確定値	37				○
d_{70}	m	通過率70%の粒径	対数正規	$2.10E-04$	0.15μ			○
p		pipingモデル係数	対数正規	1	0.12	○		
Z		耐力係数(ホワイトの定数)	確定値	0.25				○
d_{50}	m	d_{50} の基準値	確定値	0.000208				○
α	m ² /s	水の粘性係数	確定値	$1.33E-06$				○
α		heaveの限界動水勾配	対数正規	$7.00E-01$	0.1	○		

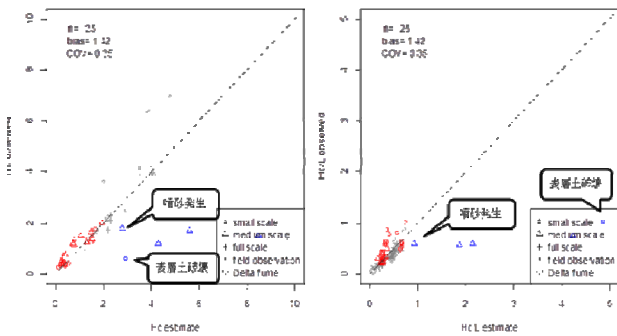


図 1 モデル化誤差の検討結果

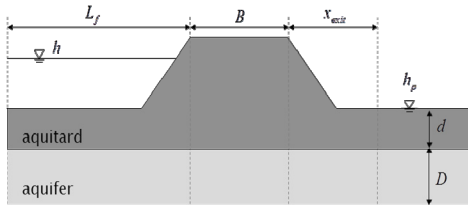


図 2 対象堤防の模式図

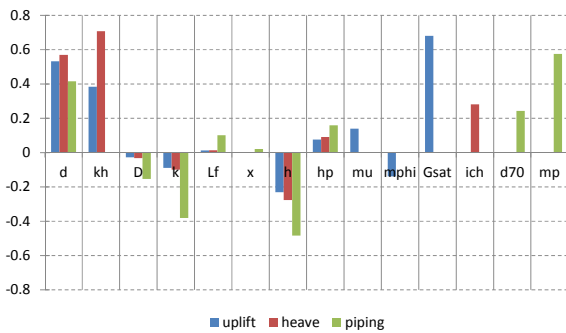


図 3 各パラメータの感度

対象断面は、図 2 に示すオランダを流れるアイセル川に沿った Dike ring 10 の南西の部分の堤体である。堤防基礎の透水性地盤に起因する破壊確率が比較的大きいため、この断面が選定された。感度分析に用いる各パラメータを表 1 に示す。

計算された感度係数は図 3 に示されている。正値は破壊モードに対する「耐力」を意味し、負値は破壊モード

における「荷重」を意味する。その二乗和は 1 となる。また、感度係数の絶対値が 1 に近い確率変数ほど、設計点における標準化値が信頼性指標に一致する傾向となり、信頼性指標に及ぼす影響が大きい。比較的寄与率が高いのは Uplift において被覆土層の層厚 d 、被覆土層の透水係数 kh 、Heave においては被覆土層の単位体積重量 γ_{sat} 、 d 、Piping においては 70% 粒径 d_{70} という結果となった。

4. 目視情報を用いた信頼性更新モデル

オランダの照査基準に基づいて信頼性を更新することを考える。オランダ基準は、Uplift (盤ぶくれ)、Heave (局所動水勾配)、Piping (パイピング) の 3 つの照査を行い、それら並列システムをなすものとしている。これを利用して計算パラメータの更新を行う。Schweckendiek et al.²⁾は、表 2 に従う基準により、河川堤防の信頼性をベイズの定理に基づいて更新することを提案している。ここで、 Z_u は、Uplift 照査の性能関数、 Z_h は、Heave 照査の性能関数、 Z_p は Piping 照査の性能関数を意味する。

例えば、ある高水が発生した時に堤防に変状が見られない場合 (No Seepage) には、この際に経験した高水程度では、「Uplift の性能関数は 0 より大きい状態にあった」という情報を獲得したと考える。制約条件に基づいて計算パラメータの不確実性を更新する。

表 2 観測結果により得られる情報

観測	Uplift	Heave	Piping
変状なし No Seepage	$Z_u > 0$		
漏水 Seepage	$Z_u < 0$		
ガマ Sand boil	$Z_u < 0$	$Z_h < 0$	

表 2 により、目視により得られた情報 (ε) が得られた場合の計算パラメータ群 X の事後分布 (確率密度) はベイズの定理により以下式で更新される。

$$f(\mathbf{X}|\varepsilon) = \frac{P(\varepsilon|\mathbf{X})}{\int P(\varepsilon|\mathbf{X})f(\mathbf{X})} = kL(\mathbf{X})f(\mathbf{X})$$

破壊 (F) する確率は、ベイズの定理により記述される。

$$P(F|\varepsilon) = \frac{P(F \cap \varepsilon)}{P(\varepsilon)}$$

もし、ある高水があり、「変状なし」の場合には、条件付き破壊確率が以下式のように記述される。

$$P(F|\varepsilon) = \frac{P(g(\mathbf{X}) < 0 \cap Z_u(\mathbf{X}) < 0)}{P(Z_u(\mathbf{X}) < 0)}$$

ここで、 $g(\mathbf{X})$ は性能関数を表す。

ここで、水位 T.P.+ 11.38 (m) 観測したと仮定する。つまり、堤内地と河川の水位差が 2m に到達したときに、下

記の3ケースで目視情報が観測されたものとして、各パラメータの分布の更新し、信頼性解析結果(超過確率)の更新を行った。なお、信頼性解析ではパラメータの分布更新に用いた水位ではなく、計画高水位 $h = T.P. + 12.7$ (m)を用いて超過確率を算出している。

- (1) Case1: 変状は見られなかった。(No Seepage)
- (2) Case2: 漏水が見られた。(Seepage)
- (3) Case3: ガマが見られた。(Sandboils)

図4, 図5は、それぞれ解析結果を示し、前者はCase1, 後者はCase3の場合を示す。なお、Case3とCase2は概ね同じ結果が得られた。図には、透水層の透水係数 k , 70%粒径 d_{70} , 被覆土層の層厚 d , 被覆土層の飽和単位体積重量 γ_{sat} の事前と事後(更新後)の分布を重ねて示してある。

高水を観測したが変状が観測されない場合(Case1)では、透水係数は事前に仮定したものよりも、やや小さく、被覆土層の層厚はやや大きく、被覆土層の単位体積重量はやや大きいと更新されている。Case3では、この逆の結果が得られた。

図6は、照査法および並列システムとしての破壊確率をCase毎に重ねて示した図である。黒の実線が事前に調査により仮定した分布(Prior)に基づく結果を表している。目視による観測であっても、信頼性を更新する結果が得られていることが分かる。目視情報は、不完全な情報であるが、堤防の安全管理に重要な意味を持つことを定量的に示した。

本研究では、観測情報を仮定して、ある1断面に対する試算から目視観測による信頼性更新を定量的に評価した。今後は、空間統計学と組み合わせることで、河川堤防を線状構造物としてとらえて、目視観測情報を含む様々な情報から危険箇所を絞り込むための方法へ拡張する予定である。

参考文献

- 1)TAW: Technical Report on Sand Boils(piping), 1999
- 2)Schweckendiek T: On reducing piping uncertainties a Bayesian decision approach, TU Delft, 2014.
- 3)大竹雄, 本城勇介: 地盤構造物設計におけるモデル化誤差の定量化, 土木学会論文集C(地圏工学), Vol.70, No.2, pp.186-198, 2014.

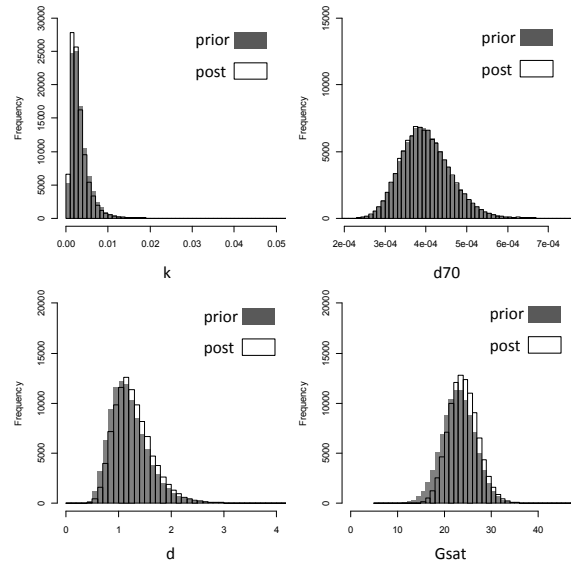


図4 Case1 (No Seepage) によるパラメータ更新結果

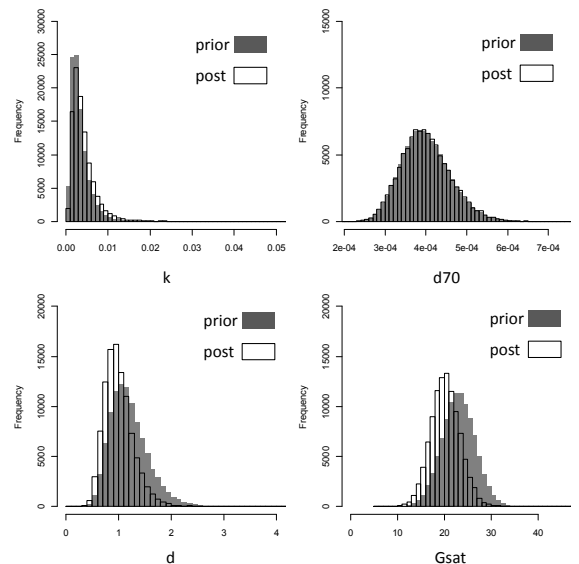


図5 Case3 (Sandboils) によるパラメータ更新結果

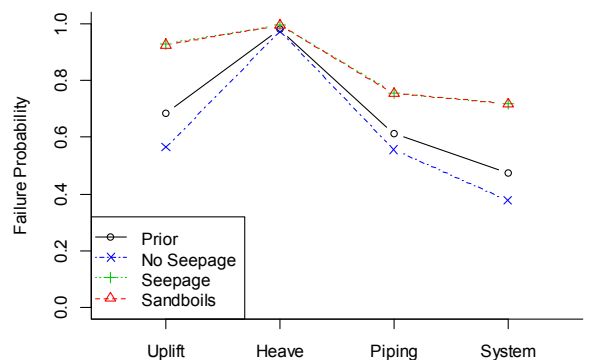


図6 破壊確率の更新結果