

応答曲面を用いた河川堤防浸透安定性評価における信頼性解析

岐阜大学 学生会員 ○平松 佑一

岐阜大学 正会員 本城 勇介, 大竹雄

(株)建設技術研究所 正会員 李圭太

名城大学 正会員 小高猛司

1. はじめに

線状で長大な人工構造物である河川堤防は、その設計上多くの不確実性が含まれる。本研究では、種々の不確実性を確率統計的に解析し、本城・大竹・加藤(2012)¹⁾が提案する信頼性解析スキームに基づいて、その安定性を評価する方法の開発をすることが目的である。そこで、ある典型的な都市・一級河川を対象に、堤体形状や地層構成、土質に関する情報を収集整理し、それらを活用して、具体的に浸透に対する安全性照査に関する信頼性解析方法の可能性を検討する。

2. 代表断面の設定

信頼性解析スキームの最初の段階として、解析を行う断面(代表断面)を設定する。本研究では、対象区間の総延長 20km で行われた既往の測量調査結果を基に、4 つの形状タイプに大別し、それぞれのタイプを代表する断面を代表断面とした。

3. 不確実性要因の定量化

不確実性要因を定量化する。当該堤防の信頼性を評価する上で考慮すべき不確実性は、地盤パラメータの「空間的バラツキ」と「統計的推定誤差」、設計計算法の精度を意味する「モデル化誤差」である。

地盤パラメータの「空間的バラツキ」と「統計的推定誤差」は、本研究では本城・大竹・加藤(2012)に基づいて評価する。対象は、排水せん断強度と透水係数である。これを評価するための基データは、既往の地盤調査・試験報告書に基づいて作製した。せん断強度は、三軸圧縮試験結果から直接得られたデータを用いる。

透水係数 $k(\text{cm/sec})$ は、79 の粒度試験から粒度分布の特徴を最もよく反映していると考えられる福田・宇野式²⁾により変換した。その結果、平均 $4.3 \times 10^{-3}(\text{cm/s})$ 、変動係数 0.15 の対数正規分布にモデル化された。せん断強度定数に関しては、54 の CUB 試験に基づく排水強度 $\phi'(^{\circ})$ を設定、平均 $36(^{\circ})$ 、変動係数 0.11 の正規分布に従うと判断された。

(1)式で示される、円弧すべり計算の精度を表すモデル化誤差(δ_{ME})については、実際の被災事例と解析結果を比較・検討した菊森(2008)³⁾を基に、円弧すべり解析のモデ

ル化誤差(δ_{ME})をモデル化した(表-1)。

$$G_c = G + \delta_{ME} \quad (1)$$

ここで、 G_c は真の安全率、 G は計算された安全率、 δ_{ME} はモデル誤差

表-1 不確実性要因

基本変数	平均値	標準偏差	COV	分布形
ϕ_{spa}	36	[0.82-1.64]	[0.02-0.05]	正規分布
ϕ_{sta}	36	4.1	0.11	正規分布
logk	-2.37	0.56	0.15	対数 正規分布
δ_{ME}	-0.05	0.18	0.19	正規分布

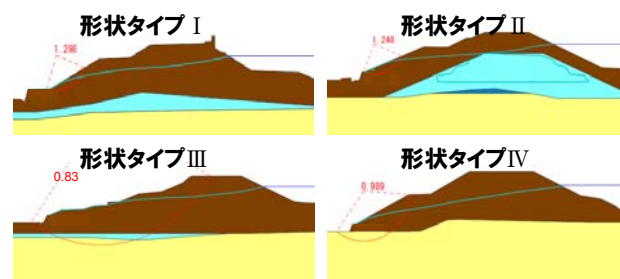


図-1 地盤解析

4. 地盤解析と信頼性評価

各代表断面について、地盤解析に基づく応答曲面の作成と、これを用いた信頼性評価を行う。ここでは形状タイプ I を例に安定性評価を行う。まず、現行設計法(河川堤防の構造検討の手引き)⁴⁾に則った地盤解析により応答値(安全率)を計算し(図-1 の形状タイプ I)、パラメトリックステディ解析を行う(図-2)。この結果を回帰分析することで近似式(応答曲面)を作成する(表-2)。図-3 に示したのは、構築した応答曲面の感度分析である。この断面では各不確実性要因の感度が同程度だという事がわかる。その応答曲面を基にモンテカルロシミュレーション(MCS : 図-4)によって限界状態(安全率 $F_s=1.0$)に達する確率(超過確率)と各不確実性要因の寄与度を求めた(表-3)。

以上の手順で、今回代表断面に設定した 4 断面で行った。

キーワード 信頼性解析, 応答曲面, 河川堤防

連絡先 岐阜大学 (〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸 1-1)

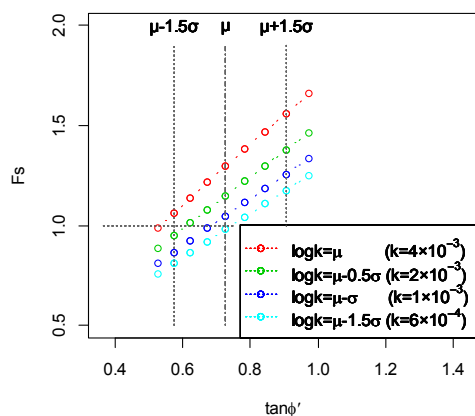


図-2 パラメトリックスティディ解析(形状タイプ I)

表-2 応答曲面

形状タイプ	回帰モデル	R²
I	$1.24 + 1.27 \tan \phi' + 0.38 \log k$	0.982
II	$0.51 + 1.35 \tan \phi' + 0.11 \log k$	0.986
III	$0.82 + 2.29 \tan \phi' + 0.22 \log k$	0.988
IV	$1.01 + 0.30 \tan \phi' + 0.14 \log k$	0.926

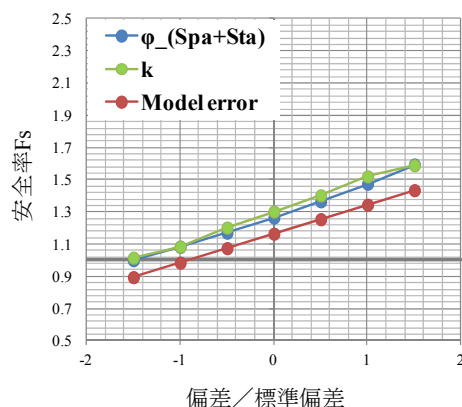


図-3 応答曲面の感度分析(形状タイプ I)

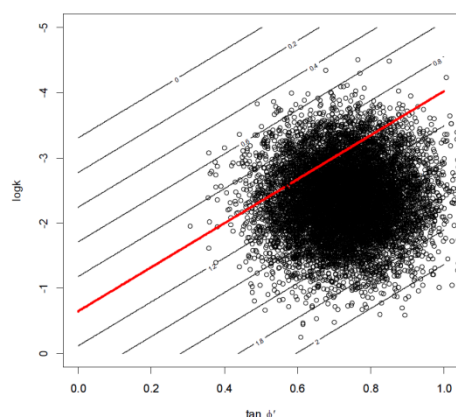


図-4 MCS(形状タイプ I)

表-3 寄与度の計算結果(形状タイプ I)

全不確実性	ϕ spa	ϕ sta	logk	δME
100%	24.8%	36.7%	27%	11.5%

図-5はその結果である。第一軸には棒グラフで示し

た不確実性(分散), 第二軸には折れ線グラフで示した超過確率である。例として取り上げた形状タイプ I と他の代表断面を比較すると, 比較的形状の類似した形状タイプ II では透水係数以外の分散と超過確率は同程度である。透水係数の分散が小さいのは旧堤と思われる透水係数の小さい層が堤体内の浸潤面をコントロールし, 堤体砂質土層の透水係数の寄与度が小さくなる為である。形状タイプ III では勾配が緩やかであるため排水強度 ϕ' の不確実性大きく, 超過確率は小さい。急勾配で透水係数の大きい砂質土層を基礎に持つ形状タイプ IV は内部摩擦角や透水係数といった地盤パラメータの分散は小さく, 超過確率が大きい。つまり確定的に危険な断面だといえる。

5. 結論

不確実性要因の定量化, 地盤パラメータを基本変数とする応答曲面の作成とそれを踏まえた堤防の信頼性評価を行う一連の方法を提示した。人工構造物である河川堤防堤体における地盤の不均質性を懸念したが, 本研究で対象とした河川堤防堤体の排水強度のバラツキは一般的な砂質土自然地盤のバラツキと同程度であることが確認できた。このことから, 区間全体の連続的な評価を行いうる可能性もあると思われる。断面形状や基礎の地盤特性の重要性を認識したのでこれを基本変数として組み入れ, さらに堤防の形状も基本変数に組み入れ, 対象区間全体の連続的な評価を今後の課題とする。

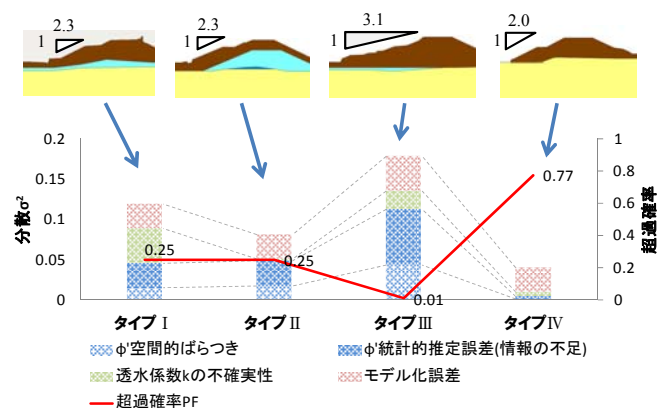


図-5 全代表断面の解析結果

参考文献

- 1) 本城勇介, 大竹雄, 加藤栄和: 地盤パラメータ局所平均の空間的ばらつきと統計的推定誤差の簡易評価理論, 土木学会論文報告集 C(地圏工学), Vol.68, No.1, pp.41-55, 2012
- 2) 福田光治, 宇野尚雄: 透水係数に関する粒度分布と間隙指標, 土木学会論文集, No.561, III-38, pp193-204, 1997
- 3) 菊森佳幹(2008): 堤防の浸透破壊に対する安全性評価の精度向上に関する調査, 国土技術政策研究所資料, No.441
- 4) 国土技術研究センター(2002): 河川堤防の構造検討の手引き