

信頼性解析の河川堤防への適用性に関する研究

土木学会 学生会員 ○平松 佑一
土木学会 正会員 本城 勇介
土木学会 正会員 大竹 雄

1. はじめに

本研究は、実在する河川堤防を対象に実際の現場条件、地盤調査データに基づいて、堤防の信頼性評価方法を開発し、不確実性分析から堤防設計の課題を見出すことを目的とする。

2. 対象地点と地盤調査データの概要

総延長は10kmあり、堤体は主に粘性土、基礎地盤は沖積粘性土である。標準貫入試験、基本物理試験(粒度、湿潤密度)、UU試験が行われている。

3. 不確実性解析

(1)地盤パラメータ

堤防設計に必要な地盤パラメータ(湿潤密度、粘着力、内部摩擦角、透水係数)を統計解析により確率分布で堤体地盤・基礎地盤に分けてモデル化する。そこで得られた確率分布モデルを地盤パラメータの不確実性要因として扱う。

また、地盤に関する情報が極めて少ないため、地盤パラメータのモデル化で示された確率分布を地盤パラメータのばらつきとする

(2)モデル化誤差

設計計算では、計算結果と真値の間には乖離が存在する。これを設計モデル化誤差と言い、信頼性設計における不確実性要因として扱う。ここでは各破壊モードにおける、基準値(制限値)との誤差の統計量を解析し確率分布へのモデル化を行う。ここで得られた確率分布を設計モデル化誤差として扱う。

4. 地盤解析と応答曲面の作成

4.1 地盤解析

地盤解析は、非定常飽和・不飽和浸透流計算ソフト SAUSE を用いる。設計外力は、過去の洪水記録を踏まえて設計外力が定められおり、それをもとに外力条件を設定する。

4.2 応答曲面の導出

(1)応答局面の導出方針

応答曲面とは、地盤解析により導いた対象構造物の応答と基本変数(地盤パラメータ、外力等)の近似的な関数関係であり、回帰分析により導出し、制限値を超えているか否かを判断するためのツールとして用いる。また、回帰分析では、基本変数となる地盤パラメータを平均値で除した値で回帰分析を行う。

これは、各基本変数のスケールを同じにすることで、応答曲面から基本変数がどの程度応答に作用するか定量的に判断できるためである

(2)回帰誤差

回帰分析にて導出した際の残差をモデル化し、これを回帰誤差 re の不確実性要因として扱う。

(3)応答曲面

堤体地盤、基礎地盤が同じ地盤条件となる各断面の評価を行う。各破壊モードで作成した応答曲面を表1に示す。

表1 各破壊モードの一般化した応答曲面

破壊モード	一般化した応答曲面	R ²
堤体すべり	$F_s = 3.60 + 3.75 \cdot C_0 - 0.87 \cdot H + 0.050 \cdot H^2$	0.951
基礎すべり	$F_s = 2.35 + 0.0066 \cdot C_0 \cdot L + 0.20 \cdot C_1 \cdot D - 0.055 \cdot H - 0.11 \cdot D - 0.013 \cdot L$	0.850
水平方向i _h	$i_h = 0.33 + 0.28 \cdot k_0 \cdot H + 0.093 \cdot k_1 / k_0 + 0.30 \cdot H - 0.013 \cdot L + 0.25 \cdot \tan \theta$	0.760
鉛直方向i _v	$i_v = 1.00 + 0.23 \cdot k_0 \cdot H + 0.26 \cdot k_1 / k_0 + 0.57 \cdot H - 0.060 \cdot L - 0.68 \cdot \tan \theta$	0.654
盤ぶくれ	$G/W = -0.99 - 0.17 \cdot k_0 \cdot H + 0.057 \cdot D - 14.84 \cdot H/L + 2.61 \cdot \tan \theta$	0.709

表2 基本変数一覧

基本変数	記号	平均値	標準偏差	分布
回帰誤差	re	0	断面と破壊	正規分布
設計モデル化誤差	e	0	モードによる	正規分布
粘着力	Bc層	1.0	0.31	正規分布
	Ac層	1.0	0.40	正規分布
内部摩擦角	Bs層	1.0	0.31	正規分布
	Bc層	1.0	0.12	対数正規分布
透水係数	Bc層	1.0	0.15	対数正規分布
	Ac層	1.0	0.15	対数正規分布

ここで、 C_0 :堤体地盤の粘着力、 C_1 :基礎地盤の粘着力、 k_0 :堤体地盤の透水係数、 k_1 :基礎地盤の透水係数、 H :堤体高さ、 L :堤体幅、 θ :裏法尻角度、 D :基礎地盤Ac層深さ。

5. 堤防の信頼性評価

(1)堤防形状と基礎粘性土(Ac層)深さ

対象区間の堤防の形状と基礎地盤Ac層深さDについて検討する。堤防の形状を表す H 、 L 、 θ は、確定値とし、調査地点間の H 、 L 、 θ は、調査地点の値で線形補間する。Ac層深さDは、ボーリング調査地点では把握することができるが、その間の区間では地質構成に不確実性があると考え、Ac層深さDの自己相関距離を算出し、krigingにより、任意の位置での平均値と標準偏差を与えた正規分布へとモデル化した。堤防全体の信頼性評価では、このAc層深さDを不確実性要因として扱う。

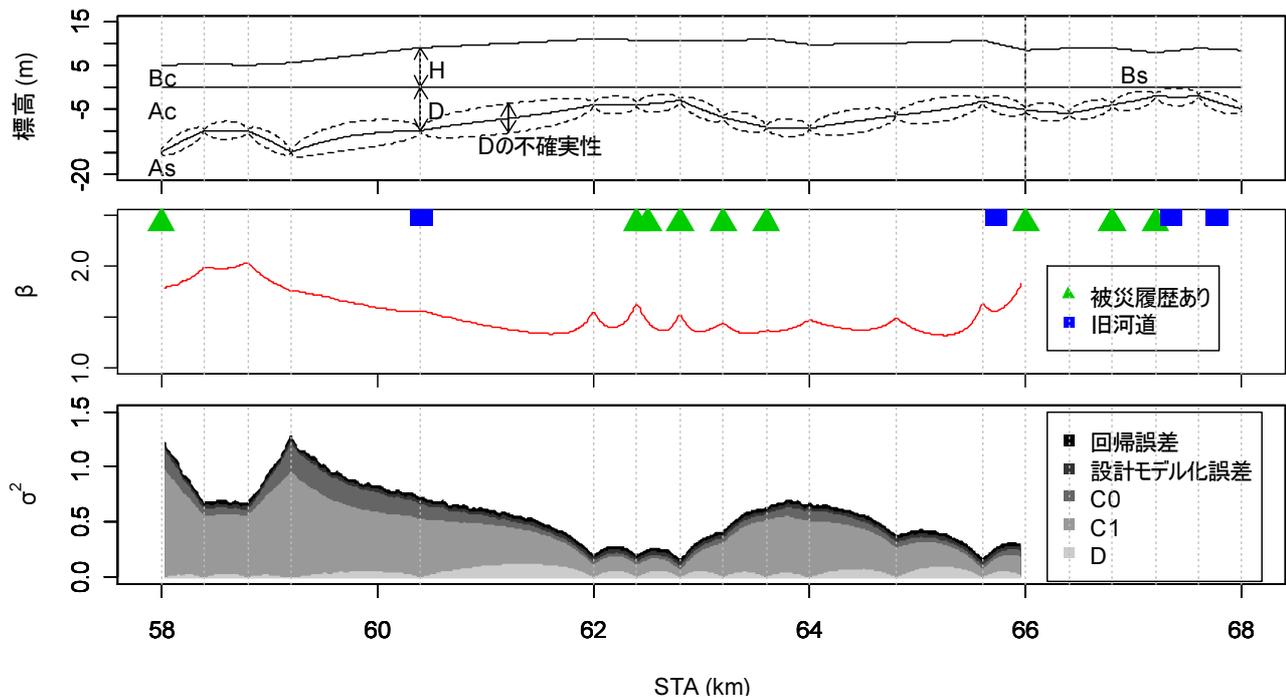


図1 堤体高さ・基礎地盤深さ と 円弧すべりにおける信頼性指標 β ・不確実性要因寄与度の分布

(2)信頼性指標と寄与度分析による評価

100m 間隔で基本変数を MCS により 10 万組生成し、制限値に対する信頼性指標 β を算出し、各不確実性要因が構造物の信頼性にどれだけ寄与するか検討する。図 1 に、対象区間の堤体高さ H ・基礎 Ac 層深さ D と円弧すべりにおける信頼性指標 β ・各不確実性要因の寄与度の分布を示す。信頼性指標 β を見ると、STA62～STA64 区間で低い値となり、他の区間と比べて円弧すべりの信頼性が低いことを示している。また、ボーリング調査地点では、調査がない地点と比較して β が高い値を示している。このことから、 β が特に下がっている間の地点で調査することで、構造物の信頼性を高めることができると考察する。寄与度分布を見ると、構造物の信頼性に対して、地盤パラメータ $C0$ 、 $C1$ の不確実性が高く、特に $C1$ (基礎地盤の粘着力)をより適切に把握しなければならないと考える。

6. 結論

- 「河川堤防の構造検討の手引き」に準拠した対象堤防全体の信頼性評価方法について検討し、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安定性を評価し、一連の方法を提示した。一方、本研究で示した河川堤防における信頼性解析法は、十分ではなく多くの課題と知見が得られた。
- 地盤に関する情報が極めて少ないため、局所平均化による空間的ばらつきの低減、サンプリン

グによる統計的推定誤差の定量化といった考慮をすることができず、地盤パラメータのモデル化で示された確率分布をそのまま地盤パラメータのばらつきにするという、極めて不自然な仮定を置かざるを得なかった。

- 今回選んだ堤防の区間において、堤体地盤の土質は、粘性土が主体となる区間であった。このため堤防の安定解析では不飽和浸透の影響はほとんど見られなかった。堤防が砂質土の場合はさらに挙動が複雑となることが予想される。

7. 参考文献

国土交通省河川局治水課：河川構造物の耐震性能照査指針（案）・同解説，2007.3，
財団法人国土技術研究センター：河川堤防の構造検討の手引き，2012.2，