

不飽和強度を考慮した河川堤防の安定解析に関する検討事例

基礎地盤コンサルタンツ（株） 萩原 協仁

1. はじめに

河川堤防の浸透に対する安全性評価は、飽和・不飽和浸透流解析によって洪水時に上昇する堤防内の浸潤線を求め、円弧すべりによる安定解析を行うものである。

安全性評価においては、複雑で変化に富む長大線状土構造物の河川堤防が対象であるため、強度定数の設定に十分な吟味が必要になることが多い。中でも、結果に与える影響が比較的大きいこととして、砂・礫質土におけるせん断破壊時の排水状態の仮定と、飽和・不飽和状態に応じた強度定数の設定などが考えられる。前者については、排水状態の仮定条件に技術者の個人差があるものの、個々のケースごとに妥当な値が設定されることが多い。一方、後者の強度定数については、浸透流解析で堤防内の飽和度分布が時系列的に求められているにも関わらず、平常時から洪水時までの一連において一律の強度が設定されていることが多い。

しかしながら、実際の不飽和領域ではサクシオンによる見掛けの粘着力(以下、不飽和強度と略称)が発生するので、河川堤防の構造検討の手引き¹⁾(以下、手引きと略称)に示される粘着力の最低値 ($c=1\text{kN/m}^2$) や飽和条件で求めた粘着力の試験値を飽和・不飽和領域全体に設定するのは、強度を過小に評価している可能性がある。

本稿では、このような不飽和強度を考慮して河川堤防の安定解析を行った検討事例を紹介する。

2. 検討条件

洪水時の堤防内浸潤線を求めるための飽和・不飽和浸透流解析は、手引きで推奨されている「SOIL2F」(基礎地盤コンサルタンツ(株)製)を使用した。

主な検討条件は以下に示すとおりで、それ以外の境界条件などの細部は基本的に手引きに準じた。

(1)解析モデル

解析モデルは、解釈しやすい検討結果を得るため、図-1のような築堤履歴が単純で透水性が良い断面とした。

Soil No.	k (m/sec)	θ_s	Ss (1/m)	$\psi \sim \theta$ kr $\sim \theta$	γ_{sat} (g/cm ³)	c (kN/m ²)	ϕ (deg)
Bg	1E-05	0.2	1E-04	S-F	2.0	1	34
As	1E-05	0.2	1E-04	SF	1.9	0	37
Ag	4E-04	0.2	1E-04	G-F	2.1	0	38

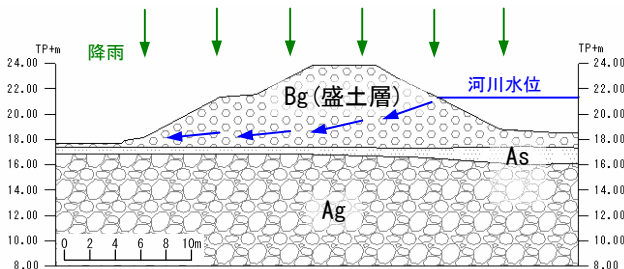


図-1 解析モデル図

(2)解析ケース

解析ケースは以下の2ケースとした。

表-1 解析ケース一覧

Case-1	盛土層の粘着力を飽和・不飽和領域全体に設定
Case-2	盛土層の粘着力を飽和度に応じた関数で与える

(3)洪水外力条件

洪水外力条件は、手引きに準じて図-2に示すような降雨と河川水位による組合せ波形を設定した。なお、図中の○印は安定解析を行う計算時点を示す。

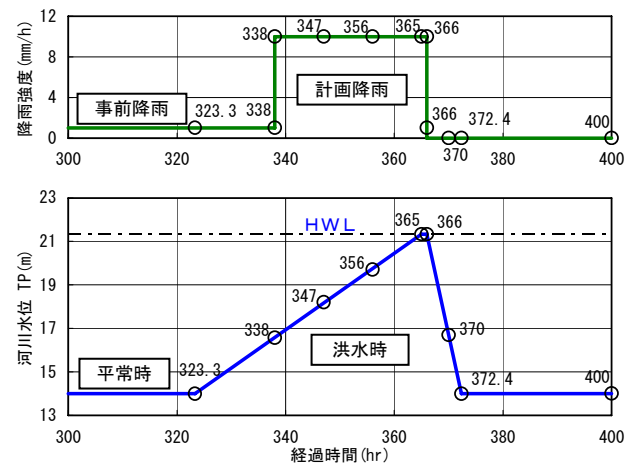


図-2 洪水外力条件

(4)地盤条件

図-3に示した既存の研究成果²⁾によると、内部摩擦角は飽和状態(含水比)と明瞭な関係が見られないことから、飽和状態に関わらず三軸圧縮試験 ($\phi d=34\text{deg}$) の結果を一様に設定した。

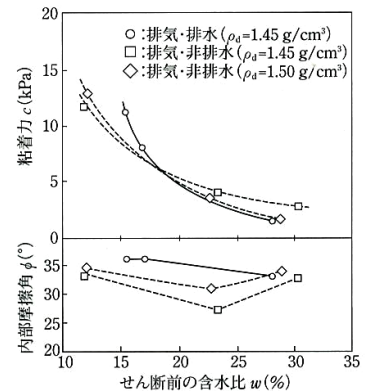


図-3 不飽和土の三軸圧縮試験による強度定数の関係²⁾

一方、粘着力と飽和度の関係は、飽和状態 ($S_r=100\%$) の粘着力を手引きに準じて $c=1\text{kN/m}^2$ とし、図-4に示した既往文献³⁾に示される次式より設定した。

$$c^* = c/c_{max} = 1.0 - 0.018 \times (S_r - S_r^*) \quad (\text{図-4参照})$$

ここに、 c : 飽和度に応じた粘着力 (kN/m²)

c_{max} : ピーク時の粘着力 (kN/m²)

S_r : 領域の飽和度 (%)

S_r^* : 粘着力がピークを示す時の飽和度 (%)

$$e=0.699 \text{より } S_r^* = -100e + 128.8 = 59\%$$

以上より求めた飽和度と粘着力の関係は図-5のようになる。

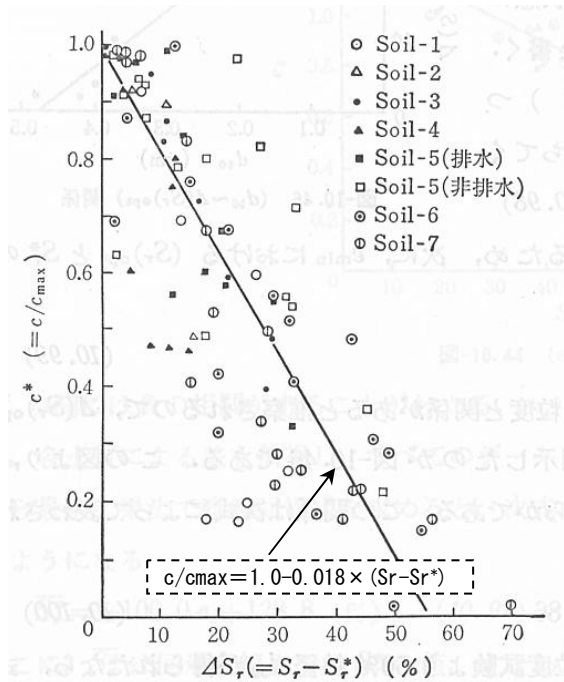


図-4 水分変化に伴う強度の遷移特性³⁾

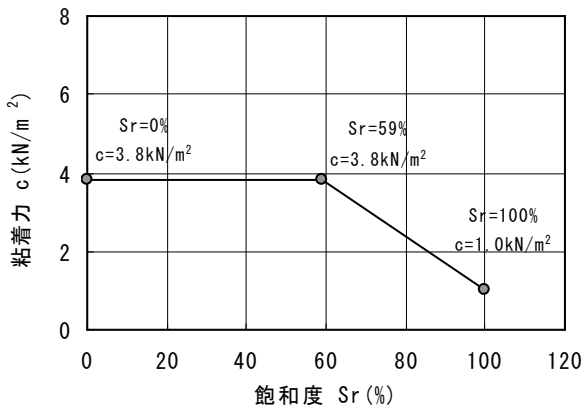


図-5 設定した飽和度と粘着力の関係

3. 検討結果

裏法すべり安全率の経時変化を図-6に示し、Case-2 (t=366hr) の安定解析結果図を図-7に示す。

この結果、不飽和強度を考慮した Case-2は、一律の粘着力を設定した Case-1よりも洪水終了時 (t=366hr) のすべり安全率が1割程度小さくなった。また、Case-2は時間の経過に伴うすべり安全率の変動幅が大きくなる結果となった。

以上の検討から得られた成果を以下に列挙する。

- ① 飽和時の強度を盛土に対して一律に設定すると、飽和・不飽和領域とすべり円弧の形状によっては、すべり安全率が過小に評価されることがわかった。
- ② 比較的透水性が高い堤防の浸透に対する安全性は、堤防内の飽和程度に応じて敏感に変化することがわかった。

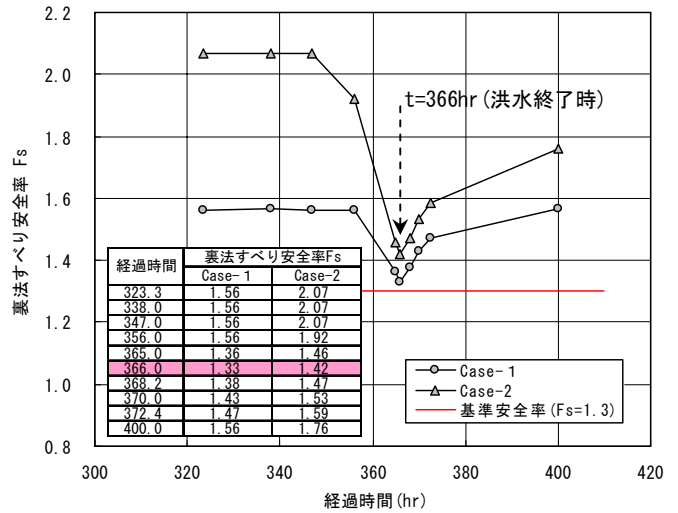


図-6 裏法すべり安全率 Fs の経時変化図

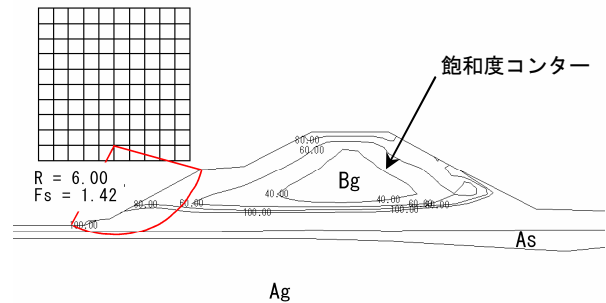


図-7 安定解析結果図 (Case-2, t=366hr)

4. おわりに

平成18年12月末現在、浸透に対する要対策区間延長は全国で2396km (直轄管理区間)⁴⁾に及び、今後膨大な対策費用と時間を要することが判明した。

このような状況の中、不飽和強度を考慮した検討は、要対策区間の中から危険箇所を抽出する際の参考資料になるものと考えられる。

また、要に応じて飽和度と強度の遷移特性を把握してから上記の検討を行うことにより、合理的な浸透対策規模が決定できるとともに、効率的な質的整備が展開されていくものと期待される。

《引用・参考文献》

- 1) 国土技術研究センター：河川堤防の構造検討の手引き，2002.7
- 2) 杉山友康，村石尚，岩崎公俊，成瀬文宏：鉄道盛土における水圧変動と降雨時の安定性、土と基礎，pp.27～32，1993.4
- 3) 松尾稔：地盤工学-信頼性設計の理念と実際-，pp.229，1984.1
- 4) 国土交通省河川局治水課：河川堤防の点検状況及び点検を受けた堤防強化について，報道発表資料，2007.3.27