

河川高水位時の堤防の破堤シミュレーションに関する研究

防災設計工学研究室 河野 智也

指導教官 大塚 悟

1. はじめに

近年、台風や集中豪雨により河川の水位が計画高水位を超え、堤防が破堤する事例が増加している。しかし、河川堤防の破堤シミュレーションの手法は1次元浸透力の釣り合い解析や、円弧すべり解析などの古典的な手法が用いられており、実際現象を表現できない問題がある。本研究では飽和・不飽和浸透解析と剛塑性有限要素法による安定解析を連成させることで条件を簡略化し、検討する2つの慣用法を1つの解析手法により精緻に解析することが可能となる。浸透破壊への適用性は締切り矢板打設地盤におけるボイリング現象の検討、堤体の不飽和土の強度変化への適用性は降雨時における自然斜面の表層崩壊について模型試験の数値解析を実施した。以上の基礎的検討を踏まえて、河川高水位時の堤防に対する安定解析を行った。

2. 現在の破堤シミュレーション

浸透に対する安定性の検討

河川水の浸透によって起こる堤防破壊の一つに、堤防裏法尻近傍の地盤において浸透水圧が上載荷重を超えて地表面に噴出するボイリング現象が挙げられる。ボイリング現象に対する検討は、一般的に Terzaghi の考えに基づくものが用いられ、土留め壁の下端付近に発生する間隙水圧とそれに抵抗する根入れ部分の土重量の関係から安定性を判定している。安全率は角柱（深さ D ）の水中重量 W と過剰間隙水圧 U との比として定義すると以下の式となる。

$$F_s = \frac{W}{U} = \frac{D\gamma'}{H\gamma_w} \quad (1)$$

ここに、 H は水頭である。

法面に対する安定性検討

河川水と降雨が堤体に浸透した場合、裏法側の浸潤面および堤体の飽和度が上昇する。飽和度の上昇によって堤体土のせん断強度が低下すると、堤体法面の崩壊が発生する。現在の安定性評価法である極限平衡法では通常円弧すべり線を仮定し、全応力法、または簡易な有効応力法によって安定性を評価している。

3. 本解析手法の適用性検討

浸透に対する安定性の検討

締切り矢板打設地盤の浸透破壊の解析を行った。解析モデルは図1に示す有限要素メッシュで、幅 60m(中心まで 30m)、高さ 20m である。

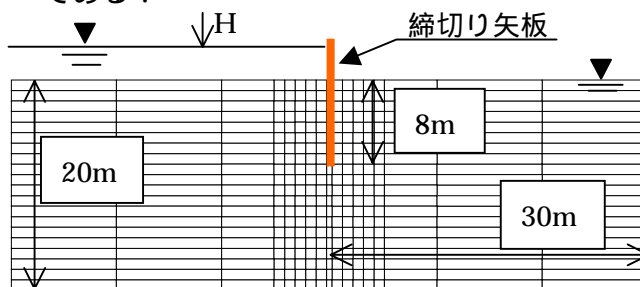


図1 解析モデル

図は幅 0.5m の締切り矢板を中央に、地表面から深さ 8m まで挿入した事例である。地盤は飽和砂質地盤として、飽和透水係数は $K_s=7 \times 10^{-1} \text{m/s}$ を用いた。

初期の圧力水頭分布は浸潤面が地表面にあると仮定し、締切り矢板より左側の水位を所定の水位 H に上昇させて定常状態の圧力水

頭分布を求めた。図2にH=15mの時の定常状態を示す。浸透解析を行った後に、求めた圧力水頭を用いて安定解析を行った。安定解析では締切り矢板の左側には水位による水圧($p = \rho gH$)を载荷した。また地盤定数は内部摩擦角 $5 \sim 30^\circ$ 、粘着力 $c=3.0\text{kPa}$ を用いた。

図3(a)(b)にH=15mの時の安定解析によるひずみ速度分布と変位速度分布を示す。締切り矢板に沿う右側の部分が浸透水圧のためにボイリング破壊を生じている。また、Terzaghiが仮定している締切り矢板の根入れ長さの半分の位置(矢板から4m)にひずみ速度が大きく生じた。安全率は1.022と得られた。

安全率が1となる水位を限界水位と言う。解析の結果、図4に示すように限界水位は強度定数(内部摩擦角)と共に増加した。

従来の慣用法によると地盤の強度定数によらずに限界水位が一定とされているが、本解析の結果によると地盤の強度定数によって限界水位の異なることが分かった。

慣用法の式(1)において、安全率が1となる限界水位は13.57mであった。慣用法と本解析を比較したところ慣用法は内部摩擦角が小さい場合に限界水位を過大に、また内部摩擦角が大きい場合に過小に評価していることが明らかになった。

内部摩擦角が小さい場合に限界水位が低くなる。これは、浸透力の一次元的な釣り合いでは地盤が破壊しない場合でも、浸透力が多次的に载荷する事で小さい浸透力でも地盤がせん断破壊されると考えられる。

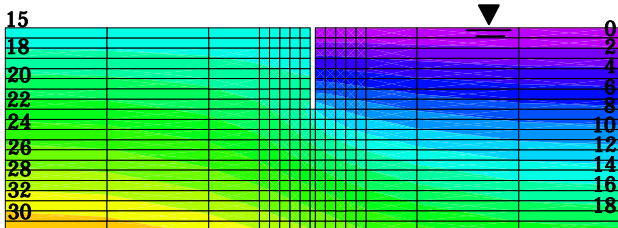


図2 浸透解析結果(H= 15m)

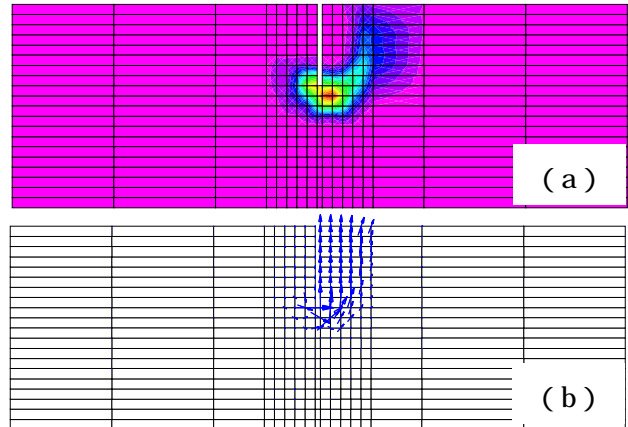


図3 安定解析結果(H= 15m , $\phi = 15^\circ$)

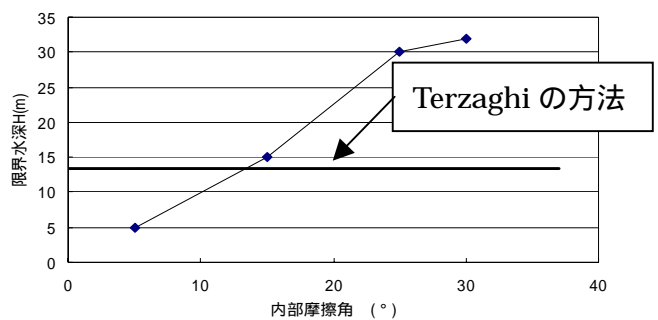


図4 内部摩擦角と限界水深

法面に対する安定性検討

河川水と降雨の浸透による堤体の強度変化に関して、降雨時における斜面崩壊試験の事例解析により解析手法の適用性を検討した。

実験は、土木研究所で行われた降雨時斜面崩壊試験¹⁾である。高さ4.0m、幅11.0m、天端幅3.0m、法面勾配1:2のモデルに外水位を固定し、15mm/hの降雨を降らせて行われた。試料の飽和透水係数は $K_s=4.5 \times 10^{-5}\text{m/s}$ 、地盤定数は飽和状態で $c=0.5\text{kPa}$ 、 $\phi=33^\circ$ 、不飽和状態で $c=4 \sim 8\text{kPa}$ 、 $\phi=32 \sim 34^\circ$ 、 $\gamma=18\text{kN/m}^3$ であった。浸潤面が表層に達したと同時に(経過時間13.25h)に法尻の表層崩壊が起こり、それに追従して上方へ4~5段階の円弧すべりによる崩壊が発生した。

解析は図5に示すモデルで行った。

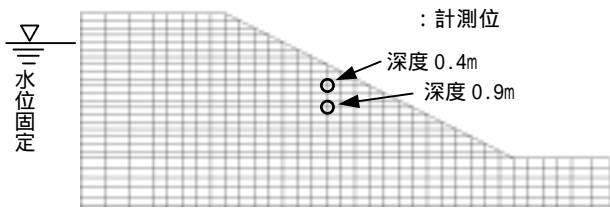


図5 解析モデル

図6は図5における法面から深さ0.4m, 0.9mの飽和度の変化を表している。地盤の水分特性曲線など詳細が分からないために適宜設定して用いたが、飽和度の変化は実験の計測結果と概略で合致する解が得られた。

図7に安定解析による安全率の経時変化、図8に13時間後の圧力水頭とひずみ速度の分布を示す。安全率は雨水の侵入と共に低下し、地下水位が法尻付近に浸出するようになった13時間後に1になり、実験による破壊時刻と合致している。この13時間後の時点で、図8に示す圧力水頭分布に見られるように浸潤面が法面に現れ、法先部に臨界すべり面が現れ小さな崩壊が生じた。その後浸潤面の上昇によって飽和帯が拡大し崩壊は法上部に拡大していった。これは、不飽和状態では飽和帯が拡大していくと粘着力が減少しせん断抵抗力が小さくなり崩壊しやすくなるからである。

以上のことから実例の斜面の浸透現象、崩壊時刻や崩壊形態を数値解析により表現することが出来た。

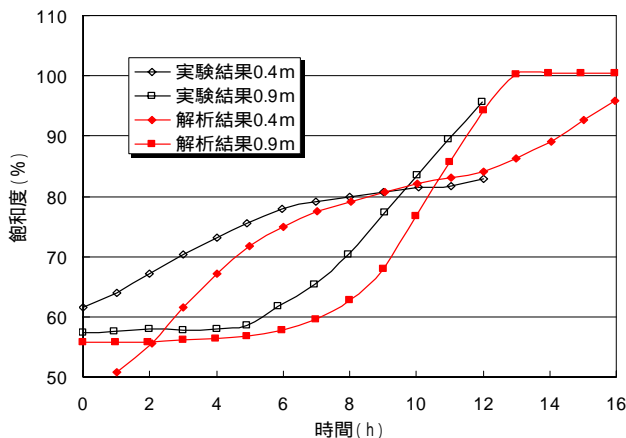


図6 浸透解析結果

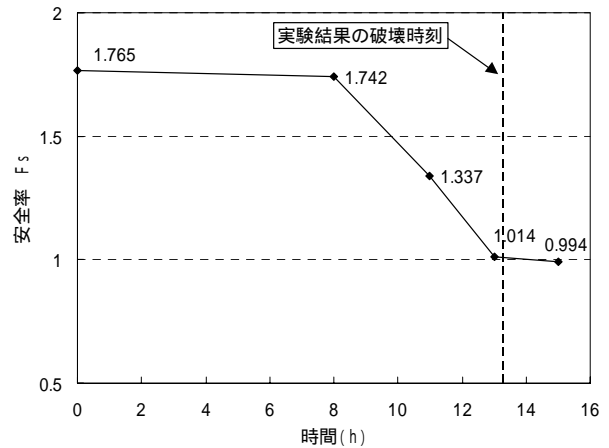


図7 安全率経時変化

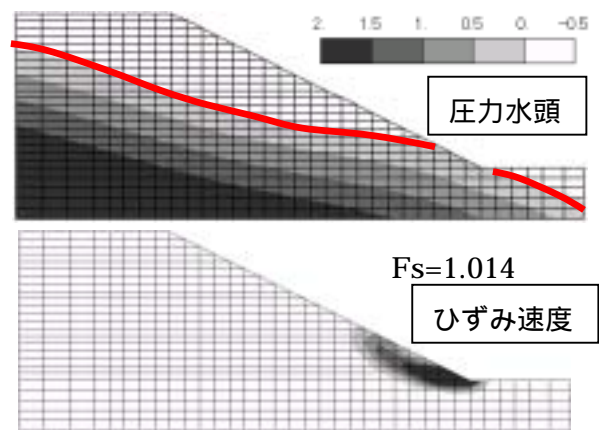


図8 13時間後

から浸透によるボイリング破壊と浸潤面の上昇による斜面の表層崩壊が本解析手法によって解析可能であることが確認できた。このことから本解析手法は、以上を同時に扱うことが可能であると言える。

4. 高水位時の堤防の安定性検討

3節での基礎的検討を踏まえて、河川高水位時の堤防に対する安定解析を行った。解析モデルを図9に示す。

なおここでの解析モデルはボイリング現象が起きやすいように裏法尻近傍を砂礫層の行き止まり地盤としている。地盤材料は、にシルト、に砂礫、は粘性土を用いた。浸透特性・強度特性を表1に示す。

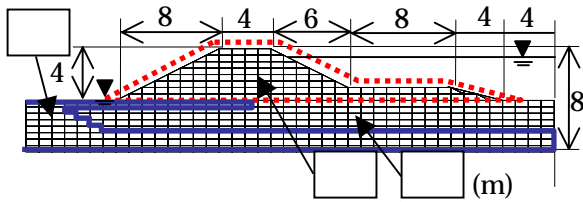


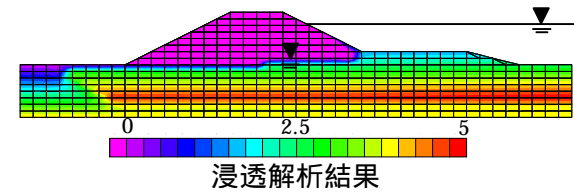
図9 解析モデル

表1 材料定数

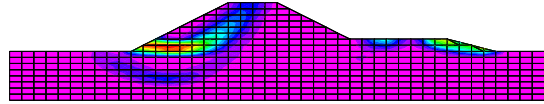
材料番号				
材料		シルト	砂礫	粘性土
浸透特性	Ks(m/h)	3.6×10^{-4}	3.6×10^{-1}	3.6×10^{-6}
強度特性 Case-1	ϕ (°)	27.00	35.00	0.00
	c'(kPa)	1.00	1.00	30.00
	τ_i (kN/m ³)	16.66	17.64	16.17
強度特性 Case-2	ϕ (°)	40.00	40.00	0.00
	c'(kPa)	1.00	1.00	10.00
	τ_i (kN/m ³)	16.66	17.64	16.17

地盤の強度変化に応じて破壊形態が現れることを確認するために、強度特性 Case-2 は、Case-1 に比べ堤体のシルトと砂礫の強度を $\phi=40^\circ$ とし、行き止まりの被覆層となる粘性土の強度は $c=10\text{kPa}$ と小さく設定した。

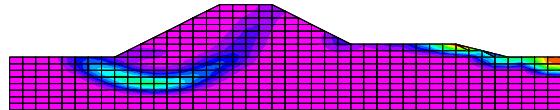
5 時間後の圧力水頭分布および安定解析結果を図 10 に示す。浸透解析では河川水の堤体および地盤への浸透により特に堤体裏法直下の地盤で間隙水圧が上昇していることが確認できる。Case-1 の事例では 2 重のすべり線が発生して崩壊した。ひずみ速度の大きさから判断して堤体部が大きく崩壊する破壊形態であり、基礎地盤の崩壊はそれほど大きくない。砂礫層が行き止まり地盤を形成するためにポイリング破壊を起こすと想定されたが、明確な破壊は確認できない。Case-2 は堤体部の強度を大きくしたために砂礫層を中心とした大きな破壊形態となった。ポイリング危険領域をせん断破壊しているが、ポイリングだけでなく堤体全体が崩壊する結果となった。



浸透解析結果



Case-1 $F_s=1.569$



Case-2 $F_s=1.560$

図10 5時間後

5. 結論

ポイリング現象といった浸透破壊と浸潤面の上昇による斜面の表層崩壊を本解析手法によって解析することができた。

河川高水位時の堤防において安定解析を行った結果、浸透力や地盤定数の違いに応じて破壊形態が現れることが確認できた。

6. 今後の課題

- ・ 五十嵐川の破堤シミュレーションのように実際現象に即した解析
- ・ 越流や洗掘などの形状変化の考慮
- ・ 遮水矢板等の対策工の効果

参考文献

- 1) 大野真希, 小橋秀俊, 古本一司, 伊勢野暁彦, 池田利昭: 堤防の浸透崩壊におけるサクションの影響に関する実験的検討, 第 39 回地盤工学研究発表会, pp.1257-1258, 2004.