

浸透によるせん断強度変化を考慮した土構造物の崩壊予測に関する研究

環境防災研究室 堀越 俊寛
主指導教員 大塚 悟

1.はじめに

近年の集中豪雨の増加により、斜面崩壊に対する防災対策が必要となっている。地盤内への雨水の浸透や地下水位の上昇により、①不飽和土のせん断強度低下、②不飽和土の重量増加によるせん断力増加、③飽和土では間隙水圧の上昇によるせん断強度低下、により斜面崩壊が発生する。本研究では非定常飽和・不飽和浸透解析から求まる斜面内の間隙水圧と飽和度分布を用いて斜面内のせん断強度変化を考慮した斜面安定解析を行ない土構造物の崩壊予測を行なう。浸透流解析には浸透流解析ソフト「SoilPlusFlow」を用いた。斜面安定解析では剛塑性有限要素法を用いる¹⁾。剛塑性有限要素法は応力 - ひずみ速度間の構成関係に基づき、地盤の破壊問題を直接解析する方法で、極限平衡法のようなすべり線の仮定が不必要であることや、河川堤防においては堤体と基礎地盤の安定性を同時に評価できるといった特徴がある。

2.模型実験解析による本解析手法の妥当性の検証

土木研究所で行なわれた大型模型土槽による降雨時斜面崩壊試験²⁾を事例解析することで、本解析手法の妥当性を検証した。

2.1 模型実験の概要

模型実験は、実験土槽内に高さ 3.0 m、天端幅 3.0 m、法面勾配 1 : 2 の盛土半断面形状に山砂を締め固め、外水位を固定すると共に、15 mm/hr の降雨を降らせて行われた。試料の透水係数は $k_s=4.5 \times 10^{-2}$ cm/sec、強度は飽和状態で $c=0$ kPa、 $\phi=31\sim33^\circ$ 、不飽和状態で $c=4\sim8$ kPa、 $\phi=32\sim34^\circ$ であった。浸潤線が表層に達したと同時に(経過時間 13.25 hr)に法面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ことが報告されている。

2.2 解析方法

図 1 に示した解析モデルについて浸透流解析を行ない、降雨開始後の各段階において安定解析を実施した。不飽和特性は実測データが不足していることから計測した飽和度に合うようフィッティングさせた。

不飽和特性を図 2 に、その他解析条件一覧を表 1 に示す。飽和時の土の強度特性は試験値を用いた。不飽和状態の強度はサクシオンによって粘着力が増加する加藤ら³⁾の次式を用いた。

$$c = S_e(q) \tan f \cdot s \quad c: \text{粘着力} \quad S_e(q): \text{有効飽和度} \\ f: \text{内部摩擦角} \quad s: \text{サクシオン}$$

表 1 中の粘着力 c は、上記の式より $0.04\sim8.6$ kN/m² 程度まで変化することを示している。不飽和状態では飽和度が上昇していくと見かけの粘着力が減少することから、せん断抵抗力が小さくなる。一方、飽和状態では水圧が上昇していくことにより、地盤の有効応力の減少に伴ってせ

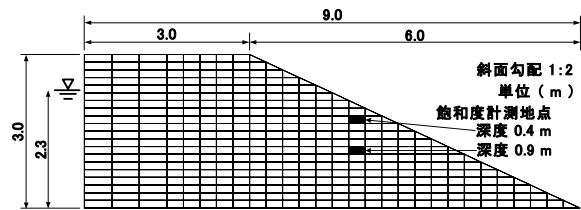


図 1 解析モデル

表 1 解析条件の設定項目と内容一覧

設定項目	設定内容
浸透解析	浸透 $k_s = 4.5 \times 10^{-2}$ cm/sec 不飽和浸透特性は図2
	水位 モデル左側に片面固定水位 $h = 2.3$ m
	降雨 モデル上面に降雨を設定 15 mm/hr
安定解析	強度特性 $c = 0.04\sim8.6$ kN/m ² $\phi = 31^\circ$
	密度 17 kN/m ³

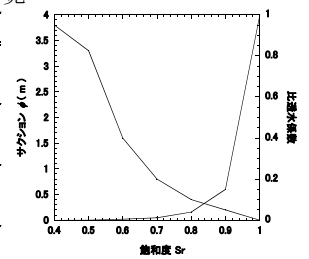


図 2 不飽和浸透特性

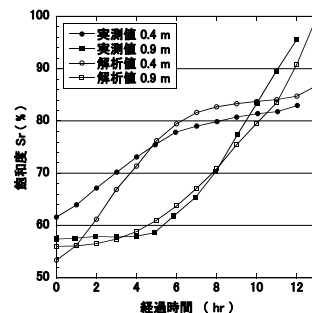


図 3 飽和度の経時変化

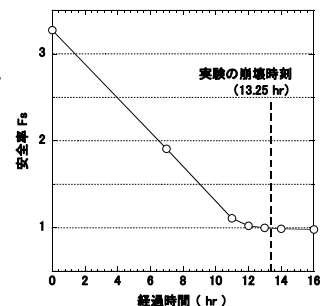


図 4 安全率の経時変化

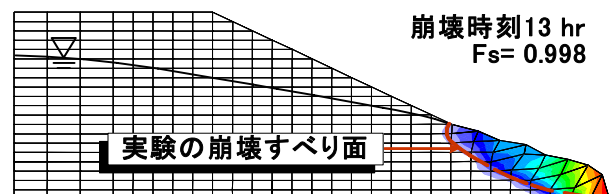


図 5 崩壊時刻におけるひずみ速度分布及び崩壊形態図

ん断抵抗力が減るため、崩壊しやすくなる特徴がある。

2.3 解析結果

図 3 から深度 0.4、0.9 m の飽和度の変化はほぼ計測結果と合致する解が得られた。図 4 から、安全率は雨水・外水位の浸入と共に低下し、崩壊時刻である 13hr には 0.998 となった。図 5 より浸潤面以下で崩壊が発生していることから、斜面先の飽和化に伴う有効応力の減少と粘着力の喪失が崩壊の発生要因であることを明らかにした。

以上の検討より、浸透流解析によって間隙水圧や飽和度分布などの定量的な評価が可能であれば、崩壊時刻や形態が実際の挙動に近い解析解が得られることを確認した。

3.河川堤防の安定性解析

本解析手法の河川堤防への適用例として平成 16 年 7.13 新潟水害で破堤した五十嵐川堤防について実際の崩壊例をもとに、実現現象のシミュレートを実施した。

3.1 五十嵐川堤防破堤の概要⁴⁾

7月13日の雨量は、五十嵐川上流の笠堀ダム観測所では、時間最大雨量73mm、累計加雨量は480mmに達する降雨であった。一方、下流の三条観測所では、時間最大雨量43mm、累計加雨量224mmと上流地域に比べ降水量が少ないことがわかる。破堤箇所においては7月13日午前10時前後に一度越水が生じ、その後一時的に水位が低下したものの、再び午前12時頃から上昇に転じ、午後1時頃に破堤に至ったものと推定される。また越流水深は最大で0.5m生じていたと考えられる。

3.2 解析方法

推定地質断面図⁴⁾を基に作成した図6の解析モデルについて安定解析を行なった。なお、解析には破堤箇所下流の断面(Case1)と破堤箇所の断面(Case2)の2ケースについて行なった。表2に解析に使用した地盤物性値を示す。浸透特性については既往の文献⁹⁾を参考に設定した。なお、水分特性曲線は表2の各土質が既往の文献⁵⁾に対応しているため割愛した。強度特性は、被災後に実施されたボーリング調査や室内試験などより設定した。各種境界条件及び初期水位を図6に示す。また、解析に使用した降雨量データ及び河川変動水位を図7に示す。

3.3 解析結果

Case2は砂礫層が消失する行き止まり地盤であり、解析の結果、堤内側地盤にヒービングによる破壊が発生することを数値解析により示した(図9 Case2)。現地調査によりボーリングが確認されていることから実現現象を本解析手法によって表現することが出来た。崩壊時刻前に安全率が1.0を下回った(図8)、これは2次元断面で解析を行なったためである。実際には3次元的に基礎地盤が変化していることから、これらの外力単独では破堤しないと考える。破堤開始地点はCase2断面のやや下流よりであることがこの事情を裏付けている。Case2断面付近では落堀が形成されたが、これは2次元断面でヒービング破壊が発生した箇所と一致していることから、破堤の過程でヒービング破壊が発生し、落堀形成に関与した可能性がある。

4. 結論

① 模型地盤の事例解析により、浸透流解析において飽和度や圧力水頭分布が定量的に評価できれば、実際挙動に近い崩壊時刻や崩壊形態を表現できることを明らかにした。

② 堤体の事例解析では堤体基礎地盤の差異により、安全率と崩壊形態の異なることを示した。実際には3次元的に基礎地盤が変化していることから、降雨や河川水位の浸透などの外力単独では破堤しないと考えられ、越流などの浸食が破堤の主原因であることが確認できた。

5. 今後の課題

- ・崩壊予測として実構造物を解析する場合、境界条件や地盤定数の不明確な点が多く、適切な解析条件の決定手法の確立が必要
- ・河川堤防においては、越流による洗掘を考慮した解析

参考文献

1)財団法人国土技術研究センター：河川堤防構造検討の手引き,2002.

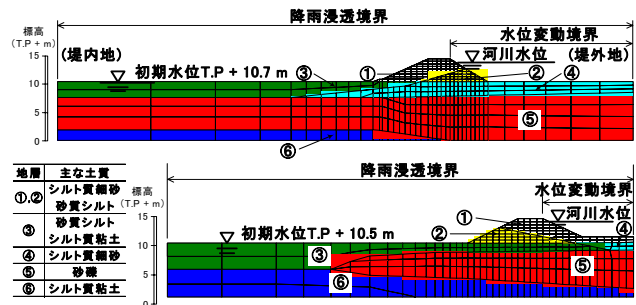


図6 解析モデル(上段 Case1,下段 Case2)

表2 地盤物性値

地層番号	①	②	③	④	⑤	⑥
浸透特性	水分特性曲線	砂質土	砂質土	粘性土	砂質土	礫質土
	k (cm/sec)	1.0E-04	1.0E-04	1.0E-05	1.0E-04	1.0E-01
強度特性	ϕ (°)	27.0	33.0	0.5	30.0	35.0
	c (kN/m ²)	1.0	1.0	30.0	0.0	0.0
	γ_t (kN/m ³)	16.66	16.66	16.17	17.64	17.64

注)不飽和浸透特性,有効間隙率,比貯留係数は既往の文献⁴⁾より設定した

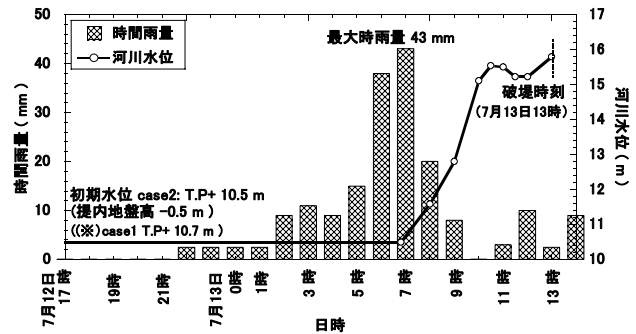


図7 破堤時刻付近の降雨量と河川水位

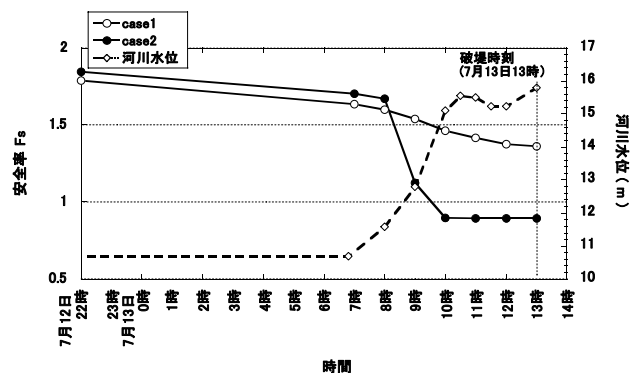


図8 安全率の経時変化と河川水位

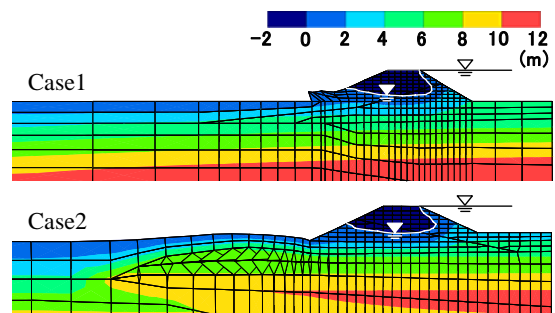


図9 崩壊時刻における圧力水頭分布と崩壊形態図