

集中豪雨による浸透流を考慮した斜面傾斜角と崩壊時の降雨時間との関係に関する解析的検討

長崎大学大学院 学生会員 ○辻 大志 フェロー会員 棚橋 由彦
 長崎大学工学部 フェロー会員 蔣 宇静 正会員 杉本 知史
 長崎大学大学院 学生会員 東 幸宏 学生会員 田中 利典

1. 研究の背景と目的

近年、異常気象や梅雨期における集中豪雨が多発している。平時安定している斜面であっても、豪雨による雨水浸透により崩壊が危惧される斜面は多数存在している。豪雨による斜面災害は、危険な箇所を予測できれば崩壊の発生を未然に防ぐことができ、さらに災害が発生する降雨強度等の降雨条件を知ることができれば、人命に関わる事故を防ぐことも期待される。

そこで本研究では、GIS によるハザードマップ作成の一助とするため、数値解析により集中豪雨を想定した斜面のケーススタディを行うことで斜面崩壊の危険度判定指標の提案の可能性について検討する。

2. 数値解析について

2.1 解析の流れ

本解析では、図-1 に示すような単純斜面のモデル化を行い、有限差分法解析コード FLAC3D により応力・浸透流連成解析を行う。FLAC3D は応力変形解析や浸透流解析が単独で実施でき、さらに応力・浸透流連成解析が可能ことから今回の解析に適している。基盤は弱風化岩（弾性体）で上層部は風化土（弾塑性体）である。

解析の流れを図-2 に示す。まず、降雨の無い時点での斜面モデルを構築するため重力安定解析を行い、次に応力を考慮せず降雨のみでの間隙水圧の変化を確認するために浸透流解析を行う。浸透流解析では、2 時間毎に間隙水圧を出力し、降雨開始から 48 時間まで計算を行う。間隙水圧の変化より、間隙水圧発生時刻を確認する。そして間隙水圧発生時刻よりも早い時刻から応力・浸透流連成解析を行い 2 時間毎に出力し、斜面崩壊が発生するまで解析を続ける。

2.2 解析の概説

浸透の支配方程式は、水圧によって表現される。異方性を有する多孔質媒体を対象としたダルシー則は(1)式で与えられる。また、節点での流れは(2)式のように飽和節点での間隙圧の変化をもたらす。応力・浸透流連成解析における崩壊の判定基準は図-3 のようなグラフで判定する。崩壊の判定基準となる不均衡力比は(3)式で表される。

$$q_i = -k_{ij} \hat{k}(s) \frac{\partial}{\partial x_j} (P - \rho_w g_k x_k) \quad \dots (1) \quad \frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{M}{V} \left(\Sigma Q + \alpha \frac{\partial v}{\partial t} \right) \quad \dots (2) \quad R_{unbal} = \frac{F}{F_{max}} \quad \dots (3)$$

ここに、 q_i : 流速ベクトル M : Biot モジュール
 k_{ij} : 透水テンソル V : モデルの体積
 $k(s)$: 比透水係数 Q : 流量
 P : 圧力 α : Biot 係数
 g_i : 重力加速度 v : メッシュの体積
 ρ_w : 水の密度 t : 時間

不均衡力比 R_{unbal} に関し F_{max} はモデル全体において、任意のメッシュの 8 節点に働く力の差のうち最も大きい値で、 F は F_{max} に指定されたメッシュに隣り合うメッシュに働く力である。この R_{unbal} が大きくなるとメッシュ同士の力の釣り合いがとれなくなり崩壊に至る。 R_{unbal} は斜面形状において連成解析を行う際、経験的に $0.000001 \leq R_{unbal} \leq 0.0001$ で安定状態とみなしている。図-3 より、降雨開始 16 時間で不均衡力比が増大しているためこの時間で斜面崩壊が生じたと判定する。

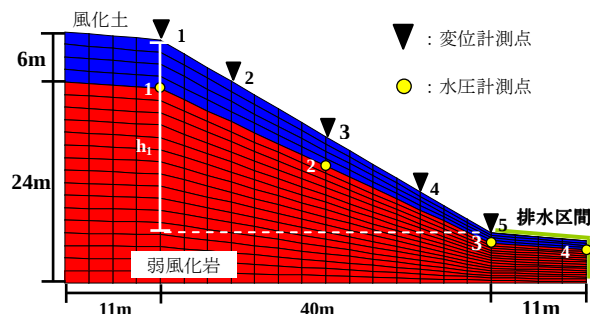


図-1 解析モデルの例（傾斜角 30 度）

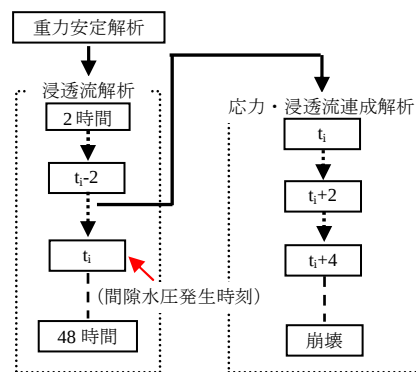


図-2 解析の流れ

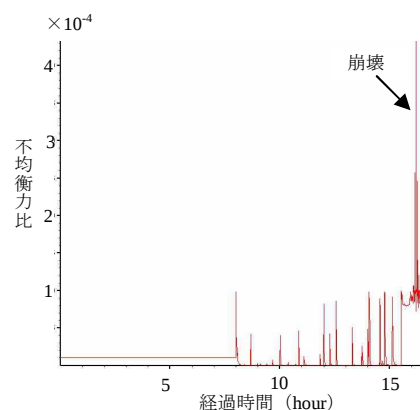


図-3 不均衡力比の変化

2.3 崩壊・非崩壊の判定基準

本研究で行った解析は設定した降雨強度を崩壊発生まで降らせるため、降雨開始から数時間で崩壊・非崩壊の基準を設定する必要がある。そこで本解析は、24時間降水量を設定した降雨強度で除した値(時間)以前で崩壊した場合を崩壊とし、そうでない場合を非崩壊とする。

今回は国内で観測史上最高の24時間降水量を記録した、高知県繁藤の979mmを受け、総雨量1000mmを基準とした。例として降雨強度50mm/hourとした場合、 $1000(\text{mm}) \div 50(\text{mm/hour}) = 20(\text{hour})$ となるので、20時間以前で崩壊したケースを崩壊と判断する。

3. 解析ケース

解析で用いるパラメータを表-1に示す。解析ケースは過去に九州で斜面崩壊が発生した箇所の内、福岡県福智町、篠栗、鹿児島県鹿児島市の3ケースを対象とした。用いた強度定数を表-2に示す。

表-1 入力パラメータ

	変形係数 E (kPa)	ポアソン比 ν	密度 ρ (g/cm ³)	間隙率 n	透水係数 k (cm/sec)
風化層	2.0×10^5	0.3	2.8	0.2	5.0×10^{-3}
基盤岩	3.0×10^5	0.13			5.0×10^{-5}

表-2 解析ケース

	case1	case2	case3
c (kPa)	50	30	70
ϕ (deg)	25	40	30

4. 解析結果と考察

浸透流解析より得られた間隙水圧の変化を図-4に示す。グラフより降雨開始6時間以降に間隙水圧が発生したことがわかる。

本解析では、各ケースにおいて傾斜角 α を20~40(deg)とし、降雨強度Rを25~100(mm/h)の範囲で解析を行った。このときの斜面傾斜角に対する崩壊時の降雨時間を図-5に示す。

グラフより、傾斜角20度から30度にかけて右下がりになっている。これは傾斜角が急になるほど低い降雨強度で崩壊する事を再現できている。しかし、傾斜角30度以上になると右上がりになっている。この原因として、傾斜角30度以上のモデルは斜面高さ h_1 を固定してモデル化を行った。これにより傾斜角が急になると斜面自体の長さが短くなり斜面全体に降る降雨量が減少し、崩壊しづらくなったものと考えられる。

図-5(a)の降雨強度100(mm/h)と福智町で発生した斜面崩壊とを比較すると、解析結果の方が数時間遅れて崩壊が発生している。これは解析のプログラム上、飽和状態に達した時に初めて間隙圧が発生するようになっているため、崩壊時間に若干の誤差が発生したと考えられる。しかし誤差範囲であるので、今回のような方法に基づき種々の代表的な材料定数に対する崩壊の危険度を推定することが可能になるものと考えられる。これらをまとめることで、崩壊危険度の判定指標の提案につながる事が期待される。

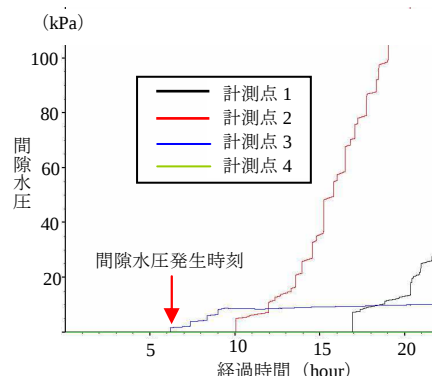


図-4 間隙水圧の変化 (case1)

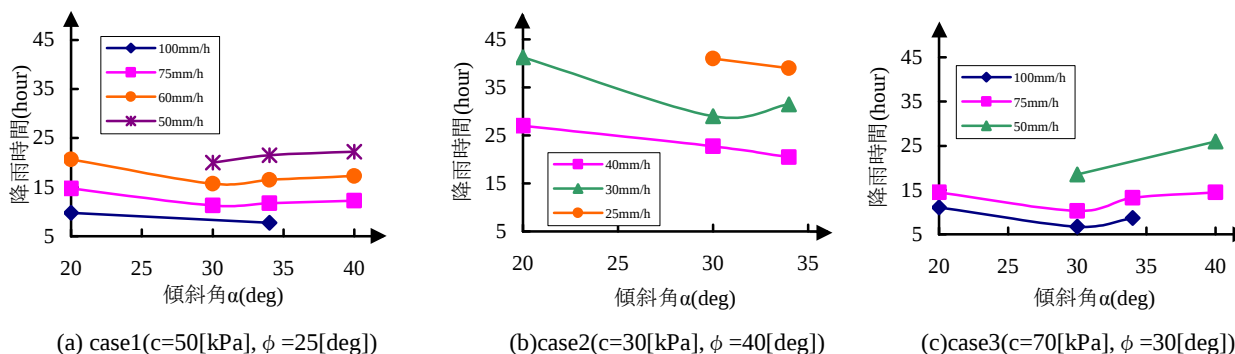


図-5 斜面傾斜角に対する崩壊時の降雨時間

5. おわりに

今回、集中豪雨を想定した斜面の解析を行い、危険度判定指標の提案の可能性を示した。このような判定指標を用いて、危険度判定を行い、この結果をGISに取り込み可視化することで豪雨による斜面崩壊のハザードマップを作成することが期待される。今後は、風化層厚やその他のパラメータを変えたケーススタディによりデータを蓄積させることや、モデル化の精度等が課題である。また不飽和時を想定した、間隙の空気と水の二層流解析を行うことも今後の課題である。

【参考文献】

- 1) 菊本祐太郎：集中豪雨による浸透流を考慮した斜面崩壊メカニズムの解明，平成21年土木学会西部支部研究発表会講演概要集（CD-ROM），pp.381-382, 2010.
- 2) (社)地盤工学会九州北部土砂災害調査団：平成21年度7月九州北部豪雨による土砂災害調査報告書，pp.90-97, 2010