

気液二相流連成モデルを用いた集中豪雨時の斜面の安定性に関する解析的検討

長崎大学大学院 学生会員 ○石田純平 フェロー会員 蔣 宇静 正会員 大嶺 聖
正会員 杉本知史 正会員 李 博 学生会員 東 幸宏

1. はじめに

近年、異常気象や梅雨期における集中豪雨が多発し、それに伴う斜面崩壊をはじめとした数多くの土砂災害が発生している。平時安定している斜面であっても、降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おり、それらの危険箇所を抽出し、さらに斜面形状や降雨強度から崩壊が発生する確率の予測が可能であれば、適切な対策を行うことで人命に関わる事故を防ぐことが期待される。自然地盤は不飽和状態にあることが多く、豪雨時には間隙水圧の増大や間隙空気の影響による間隙空気圧の増大に伴い有効応力が減少することで斜面崩壊へと至る可能性があることを確認している¹⁾。そこで本研究では、間隙空気の影響も考慮できる気液二相流による応力 - 浸透流連成解析により斜面形状と降雨強度を考慮したケーススタディを実施し、これらと斜面の安定性との関係について検討した。

2. 解析モデルおよび解析ケース

本解析では、図 - 1 に示すような傾斜が一様な斜面のモデル化を行い、斜面形状と降雨量が斜面の不安定化に及ぼす影響について考察するため、斜面の法尻から法肩までの高さ H を 20, 40, 60, 80(m)、傾斜角 α を 20, 30, 40, 50($^{\circ}$)と変化させたモデルを作成し、降雨強度 R を 25, 50, 75, 100(mm/h)と変化させて解析を実施する。解析に用いる物性値はまさ土の物理強度特性に関する既往の研究²⁾から、表 - 1 のように設定し、モデル全体に均質に与えている。解析の手順は、まず、重力安定解析を行い初期状態を再現し、次に斜面の表層から設定した降雨強度の降雨を境界における節点の速度水頭として与え、応力 - 浸透流連成解析を実施し斜面不安定化の判定を行う。モデル中の間隙水圧が定常状態に至るまでに不安定化しなかった斜面は常時安定の斜面であると判断する。

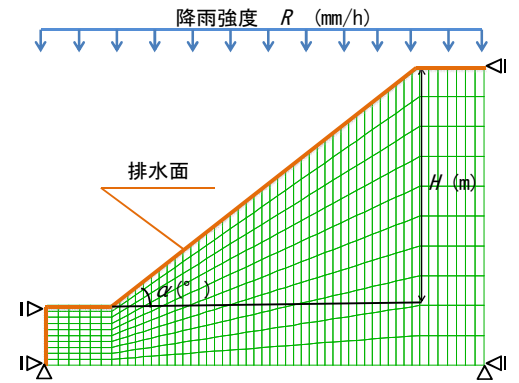


図 - 1 解析モデルの概要

3. 解析の概要

二相流とは空気相と流体相の 2 つの流れであり、その挙動はどちらもダルシー則に従うものとし、関係式を式(1)、(2)のように示す。

$$q_i^w = -k_{ij}^w \kappa_r^w \frac{\partial}{\partial x_j} (P_w - \rho_w g_k x_k) \quad (1) \quad q_i^g = -k_{ij}^g \frac{\mu_w}{\mu_g} \kappa_r^g \frac{\partial}{\partial x_j} (P_g - \rho_g g_k x_k) \quad (2)$$

ここで、 k_{ij} は飽和透水係数、 κ_r は流体の比透水係数、 μ は動粘性係数、 P は間隙圧、 ρ は流体の密度、 g は重力であり、添字の w は水を、 g は空気を表わす。式(1)と式(2)の比透水係数 κ_r は式(3)および式(4)に示す van Genuchten の実験法則により与えられる。式中の S_e は有効飽和度であり、式(5)で定義される。

$$\kappa_r^w = S_e^b \left[1 - (1 - S_e^{1/a})^a \right]^2 \quad (3) \quad \kappa_r^g = (1 - S_e)^c \left[1 - S_e^{1/a} \right]^{2a} \quad (4) \quad S_e = \frac{S_w - S_r^w}{1 - S_r^w} \quad (5)$$

ここで、 a , b , c は定数パラメータ、 S_r^w は残留飽和度である。

表 - 1 入力パラメータ

透水係数 k (m/sec)	間隙率 n	変形係数 E (MPa)	ポアソン比 ν	密度 ρ (kg/m ³)	粘着力 c (kPa)	せん断抵抗角 ϕ (deg)
1.0×10^{-5}	0.4	200	0.3	1600	15	35

4. 解析結果および考察

表 - 2 に降雨強度ごとの斜面高さ・傾斜角と崩壊時間との関係を示す。色付けしたセルは降雨により斜面が不安定化した条件であり、セル内には降雨開始から斜面が不安定化する時間(h)を示している。表中の黒で色付けした箇所は重力安定解析の結果、モデルが安定しなかった形状条件である。いずれの降雨強度でも、不安定化に至る斜面形状は同じだが、不安定化する時間は降雨強度が大きいほど早くなる。特に降雨強度 25mm/h の場合と 50mm/h の場合では不安定化する時間に 10 時間以上の差があるが、逆にそれ以上降雨強度が大きくなった場合は不安定化に至る時間に大きな違いは見られない。これはモデルの透水係数が同じであることから、降雨強度を大きくしても浸透が可能な速度に限界があるために差異がでなかったと考えられ、透水係数が大きくなると降雨強度の影響が大きくなる可能性を示唆している。

また、傾斜角が小さいときは、斜面高さが高くなるほど不安定化に至る時間が遅くなり、逆に傾斜角が大きい時は、斜面の高さが高くなるほど不安定化に至る時間が早くなる傾向がある。特に表中の濃い色で塗りつぶした箇所は他に比べ極端に不安定化する時間が早い。同じ斜面高さで傾斜角

を変化させたモデルに対し降雨強度 100mm/h で降雨を与えた時の間隙水圧と飽和度分布の経時変化を図 - 2 と図 - 3 にそれぞれ示している。図 - 2(a) に示すように降雨開始後の斜面内の間隙水圧分布は、初期は表層部から間隙水圧が上昇し、その後、層の薄い法尻部周辺で降雨浸透の浸潤面がモデル底部の不透水層に達し、モデル下部から間隙水圧が上昇していく。傾斜角の小さい斜面モデルの場合、モデル下部から上昇する間隙水圧によって有効応力が減少し、不安定化に至ったと考えられ、斜面高さが高いほど浸潤面がモデル下部に達するのが遅くなるために、不安定化するのが遅くなったと考えられる。また、傾斜角が大きい場合、法尻部分に応力が集中するため、雨水浸透による有効応力の減少とは別に形状による物理的な影響が斜面の不安定化を引き起こす原因になると考えられ、図 - 3 より降雨開始直後には表層付近の飽和度が急激に上昇することが確認できることから、斜面の高さが高いほど降雨の浸透による土塊自重が増加するために土塊の滑動力が大きくなり、崩壊に至る時間が早くなったと考えられる。

5. おわりに

本研究では、斜面形状と降雨強度に関するケーススタディにより、これらが斜面の不安定化に与える影響について検討した。本研究では斜面の地盤を均質なものとし、また、地下水の存在も考慮せずに解析を実施したが、実際の地盤は表層部に風化土層を有していたり地下水も表層付近まで存在する場合が多い。今後はそれらの影響も考慮して、斜面不安定化の予測指標の作成と実現場への適用の可能性について検討する。

参考文献

- 1) 石田純平 他：気液二相流解析による集中豪雨時の斜面内における間隙水圧・間隙空気圧の挙動解明，第 48 回地盤工学研究発表会講演集，pp.1961-1962，2013.7.
- 2) 西田一彦，青山千彰：物理強度特性からみた乱さないまさ土の分類，土木学会論文集，第 352 号，Ⅲ-2，pp. 159-168，1984.

表 - 2 斜面高さ・傾斜角と崩壊時間との関係

(a) R=25mm/h					(b) R=50mm/h				
H(m) \ α (°)	20	30	40	50	H(m) \ α (°)	20	30	40	50
20			250	225	20			223	203
40		378	250	25	40		320	223	20
60		410	215		60		360	195	
80		420	145		80		360	105	

(c) R=75mm/h					(d) R=100mm/h				
H(m) \ α (°)	20	30	40	50	H(m) \ α (°)	20	30	40	50
20			220	200	20			218	200
40		318	220	17.5	40		315	218	15
60		360	193		60		360	190	
80		360	100		80		360	97.5	

※セル内の数字は降雨開始から斜面が不安定化するまでの時間(h)

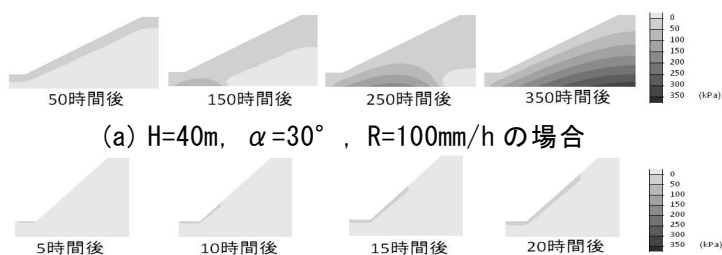


図 - 2 間隙水圧分布の経時変化

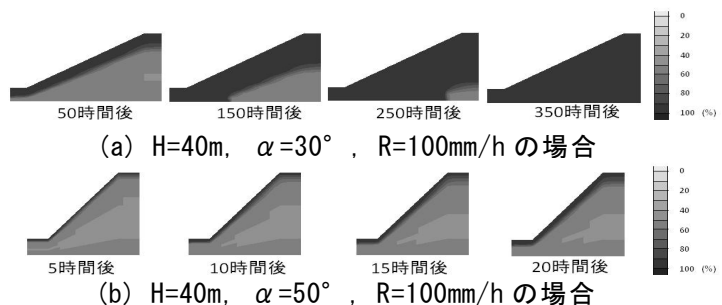


図 - 3 飽和度分布の経時変化