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	〇石田純	平	長崎大学大学院	フェロー会員	蒋	宇静
長崎大学大学院	正会員	大嶺	聖	長崎大学大学院	正会員	杉本	卜知史
長崎大学大学院	正会員	李	博	株式会社地層科学研究所	正会員	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閉塞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 ー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. 解析の概要

二相流とは気相と液相の2つの流れであり、その挙動はどちらも式(1)、(2)のダルシー則に従うものとする.

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

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は重力加速度 であり, 添え字の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.

$$\kappa_{r}^{w} = S_{e}^{b} \left[1 - \left(1 - S_{e}^{1/a} \right)^{a} \right]^{2} \qquad (3) \qquad \kappa_{r}^{g} = \left(1 - S_{e} \right)^{c} \left[1 - S_{e}^{1/a} \right]^{2a} \qquad (4)$$
$$S_{e} = \frac{S_{w} - S_{r}^{w}}{1 - S_{r}^{w}} \qquad (5)$$

ここで, a, b, c は定数パラメータ, S_w は液体の飽和度, S_r^w は残留飽和度である.

3. 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 形状と降雨強度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(°)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

表-1 入力物性值

透水係数 k(m/sec)	1.0×10 ⁻⁵
間隙率 n	0.4
変形係数 E(MPa)	200
ポアソン比 <i>ν</i>	0.3
密度 ρ (kg/m³)	1600
粘着力 c(kPa)	15
せん断抵抗角 ϕ (°)	35

キーワード 二相流,間隙圧,斜面形状

連絡先 〒852-8521 長崎県長崎市文教町 1-14 長崎大学工学部社会環境デザイン工学コース

TEL 095-819-2627

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斜面であり,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 25mm/h の場合と 50mm/h の場合では不安定化 する時間に数十時間の差があるが,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かった.これ はモデル中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, 傾斜角が比較的小さい場合は, 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, 逆に傾斜角が比較的大きい場合は, 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 50mm/h で降雨を与えた時の間隙水圧分布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、傾斜角の比較的小さいモデルの場合、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、斜面の高さが高いほど、浸潤面がモデル下部に達するのが J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、傾斜角が比較的大きい場合、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.

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

