

気液二相流解析による斜面安定機構の解明に関する基礎的研究

長崎大学大学院 学生会員 ○田中利典 フェロー会員 蔣 宇静 正会員 杉本知史
長崎大学大学院 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いる。豪雨時には、雨水浸透による間隙水圧の増大や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し、斜面崩壊へと至る可能性がある。特に、自然斜面は不飽和状態にあることが多く、間隙空気圧の影響も考慮すべきである。そこで本研究では、間隙空気圧の影響も考慮できる気液二相流による浸透流解析および応力 - 浸透流解析を実施する。これにより間隙水圧と間隙空気圧の増大による有効応力の減少に起因する斜面崩壊のメカニズムを解明することを目的とする。

2. 解析の概説

本研究では、有限差分法応力 - 浸透流連成解析手法を用いる(解析コード：FLAC2D)。FLAC 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 - 浸透流連成解析が実施可能であることから、今回の解析に適している。二相流理論における流体の輸送は、(1)、(2)式に示すダルシー則により表現される。

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

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 は間隙水圧、 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。(1)、(2)式中の比透水係数 κ_r は(3)式および(4)式に示すvan Genuchtenの実験法則により与えられる。(3)、(4)式中の S_e は有効飽和度であり、(5)式で定義される。

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

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。

応力 - 浸透流連成解析における斜面の不安定は(6)式に示す最大不均衡力比 R_{unbal} で判定する。

$$R_{unbal} = \frac{F_{\max}}{F} \quad (6)$$

$F_{\max}$ はモデル全体において、任意のメッシュの節点に作用する力のうち最大の値である。 F は $F_{\max}$ に指定されたメッシュに隣り合うメッシュに作用する力である。この R_{unbal} が大きくなるとメッシュ同士の釣り合いがとれなくなり崩壊に至る。斜面の連成解析を行う際、 $R_{unbal} \leq 1.0 \times 10^{-4}$ を安定状態とみなしている。

3. 解析モデル

2009年7月に九州北部において集中豪雨が発生した。この豪雨により福岡県田川郡福智町弁城で斜面崩壊が発生し、大きな被害をもたらした。図-1に斜面崩壊縦断面図を示す。頭部の崩壊は基盤岩の風化部が崩壊したものであるが、それより下部は旧崩積土を巻き込んで流下した崩壊と推定される。この現場を対象として再現解析を行う。

図-2に解析モデルを示す。基盤は弱風化岩(弾性体)、表層は風化土(弾塑性体)である。降雨強度は気象データを基に100mm/hとした。なお、解析に用いた物性値は表-1に示す。

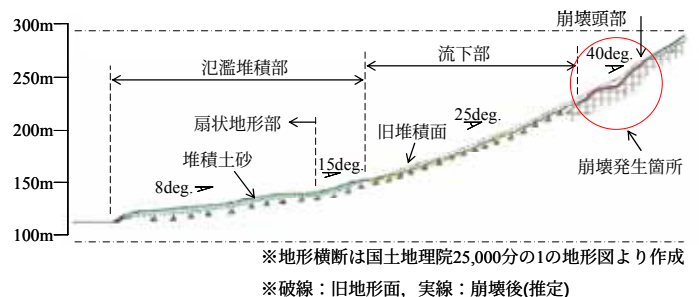


図-1 福智町斜面崩壊の縦断面図(推定)¹⁾

4. 解析結果

図-3に最大不均衡力比の経時変化を示す。降雨開始4時間後付近で急激に増大していることから、降雨開始4時間後に斜面が崩壊したと考えられる。図-4に計測点2の間隙水圧および間隙空気圧の経時変化を示す。時間の経過とともに間隙水圧・間隙空気圧ともに上昇し、崩壊発生時には正の間隙圧が生じている。図-5に降雨開始4時間後のせん断ひずみ増分の分布図を示す。斜面表層部でせん断ひずみが増大している箇所が確認できる。せん断ひずみ増分の分布から、崩壊形態は表層崩壊とみなすことができる。実際の崩壊斜面も表層崩壊であり、また、崩壊位置もほぼ同位置であると考えられる。

図-6に降雨開始2, 3, 4時間後の間隙水圧の分布を示す。時間の経過とともに間隙水圧が増大している。特に、崩壊発生箇所周辺で間隙水圧の上昇が見られる。図-7に降雨開始2, 3, 4時間後の間隙空気圧の分布を示す。間隙水圧分布と同様に崩壊発生箇所周辺で間隙空気圧が増大していることが確認できる。

図-6および図-7から、崩壊面近傍での高い間隙水圧の発生や間隙空気圧の上昇により、有効応力が減少した結果、斜面崩壊が発生したと考えられる。

5. おわりに

本研究では間隙空気を考慮した斜面の二相流解析を行い、豪雨時の間隙水圧や間隙空気圧の発生が斜面の安定性に与える影響について考察した。雨水浸透により、崩壊発生箇所近傍で間隙水圧や間隙空気圧が増大しており、これらが斜面崩壊の要因の一つとなっていることを明らかにできた。

今後様々な条件に対して解析を行えば、豪雨時の斜面危険度の判断が可能となる。しかし、自然斜面は地盤が不均一で複雑であるため、今後は地盤の強度パラメータの設定や不均一性を考慮した解析方法などを考えることが課題である。

参考文献

- 1) 地盤工学会九州北部土砂災害調査団：平成21年7月九州北部豪雨による土砂災害状況の緊急報告，報告会資料，2009。

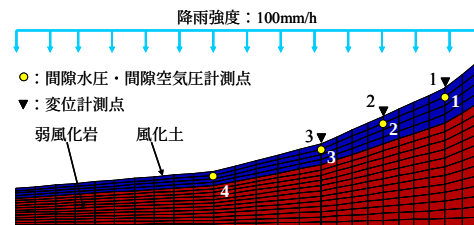


図-2 解析モデル

表-1 入力物性値

	風化土	弱風化岩
透水係数 k_h (cm/sec)	2.66×10^{-3}	5.0×10^{-5}
間隙率 n	0.2	0.2
変形係数 E (MPa)	200	300
ポアソン比 ν	0.3	0.13
密度 ρ (kg/m ³)	1800	2300
粘着力 c (kPa)	12.7	—
せん断抵抗角 ϕ (deg)	36.9	—

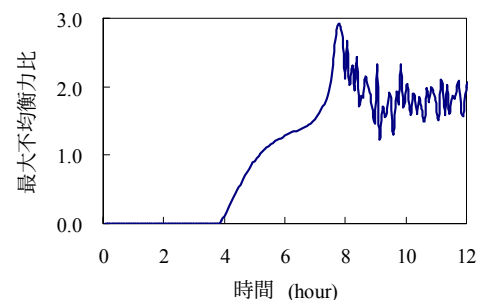


図-3 最大不均衡力比の経時変化

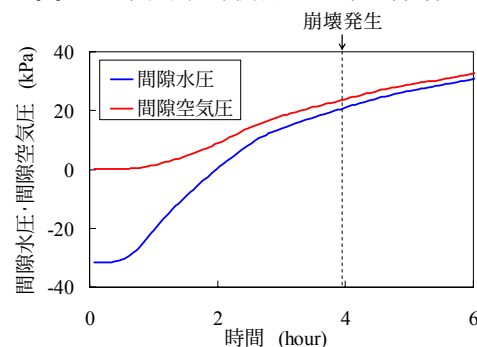
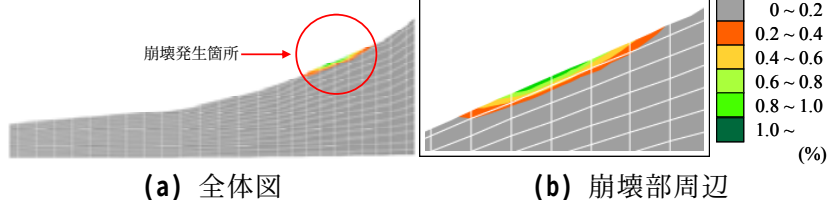


図-4 間隙水圧・間隙空気圧の変化



(a) 全体図 (b) 崩壊部周辺
図-5 せん断ひずみ増分分布図(4時間後)

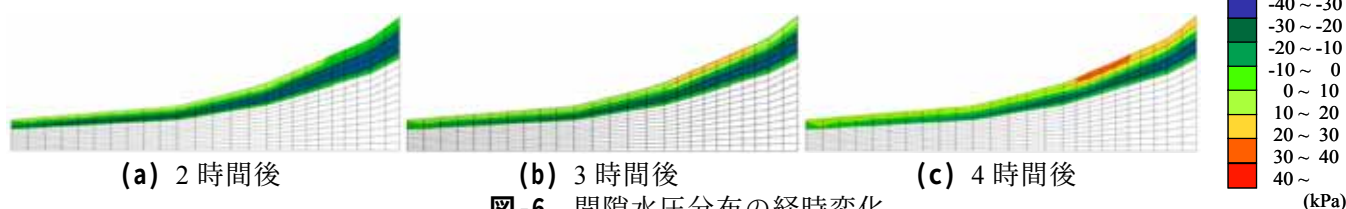


図-6 間隙水圧分布の経時変化

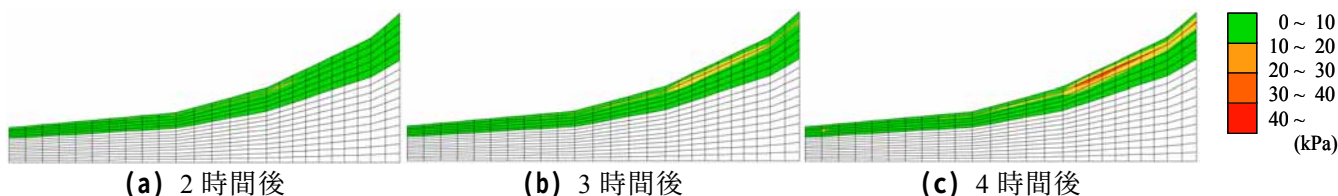


図-7 間隙空気圧分布の経時変化