

# 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

長崎大学大学院 学生会員 吉田徳美 フェロー会員 蔣 宇静  
 長崎大学大学院 正会員 大嶺 聖 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 浸透流解析を単純斜面モデルで実施する。また、本研究のモデルと同じ寸法で斜面の模型実験を行っている関連研究との整合性を検証することを目的としている。これらにより間隙水圧と間隙空気圧の挙動を把握することで、集中豪雨による斜面崩壊の評価解析の研究に役立てる。

## 2. 解析の概説

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する。以下の式(1)、(2)はダルシー則である。

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

ここで、 $k_{ij}$ は飽和透水係数、 $\kappa_r$ は流体の比透水係数、 $\mu$ は動粘性係数、 $P$ は間隙圧、 $\rho$ 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  $\kappa_r$ 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。式(1)と式(2)において流体の輸送が表現されており、応力変形解析や浸透流解析の単独実施、応力 浸透流連成解析の実施が可能であることから、有限差分法応力 浸透流連成解析手法を本研究で用いることにした。

## 3. 解析モデルと解析ケース

解析に用いた地盤の物性値は 2009 年北九州において発生した集中豪雨による斜面崩壊の事例<sup>1)</sup>を参考に表-1のように設定した。図-1に傾斜角 40°の解析モデルと降雨、排水条件を示す。モデルの寸法は、本研究の解析手法の有用性を検証するための斜面の模型実験を行うことが可能な寸法を採用している。間隙水圧・間隙空気圧を法肩(No.1)、斜面中央(No.2)、法尻(No.3)の3箇所で計測した。集中豪雨を模擬するため、降雨強度を 100mm/h、50mm/h、25mm/h に、斜面の傾斜角による安定性の違いを確認する

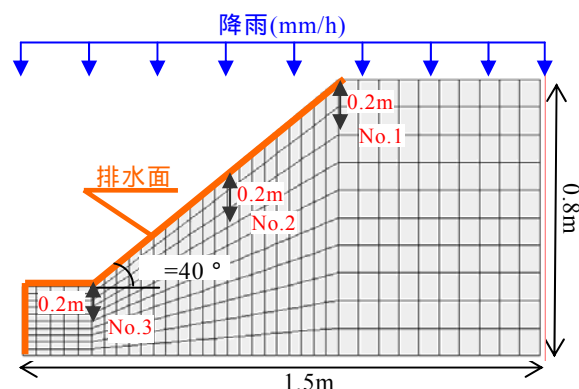


図-1 解析モデルの例(傾斜角 =40°)

表-1 入力物性値

ため傾斜角を 40°、30°、20°に設定した。その解析ケースを表-2に示す。

透水係数 k(m/sec)	間隙率 n	変形係数 E (MPa)	ポアソン比 ν	乾燥密度 ρ <sub>d</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	粘着力 c <sub>d</sub> (kPa)	せん断抵抗角 α(deg)
2.66 × 10 <sup>-5</sup>	0.2	200	0.3	1800	12.7	36.9

#### 4. 解析結果および考察

case1-2(降雨強度 50mm/h, 傾斜角 40°)における間隙水圧の経時変化を図-2 に, 間隙空気圧の経時変化を図-3 に示す。時間の経過とともに間隙水圧・間隙空気圧ともに上昇していることがわかる。図-4 に case1-1, 1-2, 1-3, 2-2, 3-2 の法尻(観測点 No.3)での間隙水圧と間隙空気圧の経時変化を示す。降雨量に着目すると(case1-1, 1-2, 1-3)降雨量の多いほうから順に間隙水圧・間隙空気圧ともに発生している。また傾斜角に着目すると(case1-2, 2-2, 3-2)傾斜角が小さいほうから順に間隙水圧・間隙空気圧ともに発生している。収束値は降雨強度, 傾斜角に拘らずほぼ一定である。図-5 に case1-2(降雨強度 50mm/h, 傾斜角 40°)における降雨開始 10, 40, 80, 120 分後の間隙水圧分布を示す。時間の経過とともに間隙水圧が増大している。降雨強度 50mm/h の際は雨水が斜面に沿って最下部まで浸透していき, 計測点 No.3 付近の法尻部分から徐々に間隙水圧が上昇していることがわかる。図-6 に同じく case1-2(降雨強度 50mm/h, 傾斜角 40°)における降雨開始 10, 40, 80, 120 分後の間隙空気圧分布を示す。時間経過とともに間隙空気圧は上昇している。図-5(a)と図-6(a)を比較してみると, 降雨の浸透によって間隙空気の閉塞が斜面に沿った状態で始まり, 図-5(b)と図-6(b)では間隙空気の閉塞が斜面から底面に向けて進行していることが確認できる。

#### 5. おわりに

本研究では間隙空気を考慮した単純斜面の二相流解析を行い, 集中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。また, 降雨強度を変えることによる雨水浸透や空気圧の挙動を明らかにした。

##### 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.
- 2) 田中利典 他: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, 平成 23 年土木学会西部支部研究発表会講演概要集, -098, 2012

表-2 解析ケース

傾斜角 (deg)	40	30	20
降雨強度 R(mm/h)			
100	case1-1	case2-1	case3-1
50	case1-2	case2-2	case3-2
25	case1-3	case2-3	case3-3

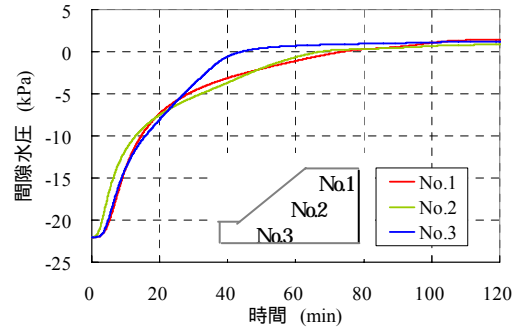


図-2 間隙水圧の変化(case1-2)

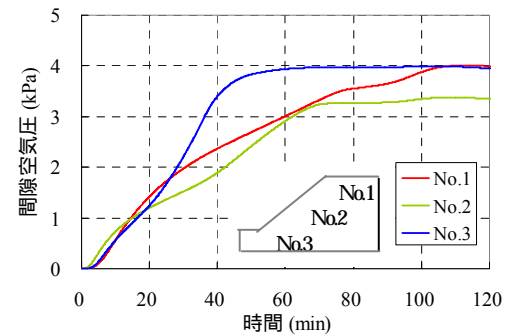


図-3 間隙空気圧の変化(case1-2)

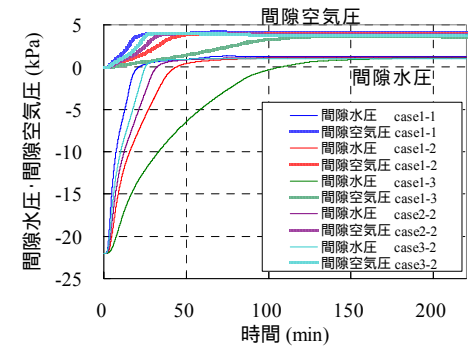


図-4 間隙水圧・間隙空気圧の変化(計測点 No.3)

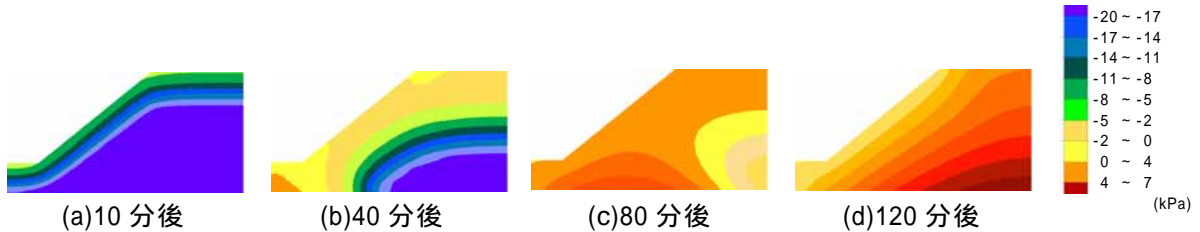


図-5 間隙水圧分布の経時変化 (case1-2)

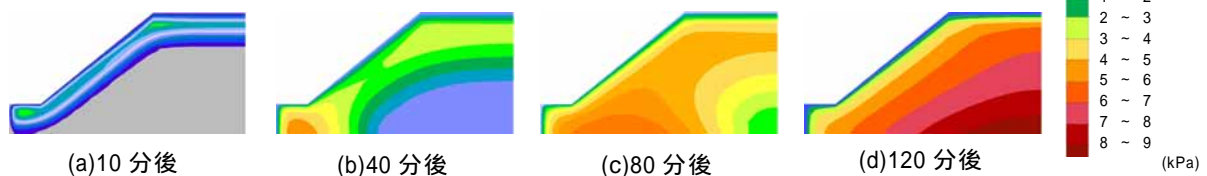


図-6 間隙空気圧分布の経時変化 (case1-2)