

# 飽和度上昇時のせん断強度低下による豪雨時斜面崩壊の連成解析による検討

株式会社 地層科学研究所 正会員 ○中川 光雄

## 1. はじめに

近年、豪雨による自然斜面の土砂災害が数多く発生しており、ハザードマップ作製などに必要な崩壊箇所の特定や、その箇所に適した対策工の立案が急務である。斜面の豪雨時危険度評価では、飽和・不飽和浸透流解析によって間隙水圧分布を得て、これを別途極限平衡解析等と与えて特定時間の安全率を算定する方法がある。この方法は実用的であるが、時間は不連続であり、応力・変形・浸透が統合的に評価されている訳ではない。より有効な対策工法を立案する点からも、崩壊の「発生場所」のみならず、「発生時間」、さらに、「発生規模や発生形態」を、連続した時間で、力学的・水理学的に相互作用を連成した手法で予測を行うことが望まれる。これには、応力-浸透連成解析の適用が有効であると思われる。

さて、豪雨時の斜面崩壊の要因として、飽和領域での間隙水圧による有効応力低下、および、不飽和領域での飽和度上昇によるせん断強度低下<sup>1)</sup>が挙げられ、実際には両者が複合して作用すると思われる。前者の要因による連成解析による検討は著者らが公表<sup>2)</sup>しているが、後者の効果を導入した連成解析による検討はあまり見受けられない。加藤ら<sup>3)</sup>は、サクシオンと粘着力増分の関係式を示しており、水分特性に基づく推定式の一つと考えることができる。本報では、この関係式を応力浸透連成解析に導入し、その影響効果を検討した。

## 2. 飽和度の上昇によるせん断強度の低下

サクシオンと強度増分の関係を推定する方法は幾つか提案されており、この中で、加藤ら<sup>3)</sup>は、ある飽和度のもとでサクシオンと粘着力の関係式(1)で与えている。

$$c = p_s \tan \phi_{net} = \frac{S_r - S_{r0}}{100 - S_{r0}} s \tan \phi_{net} \quad (1)$$

ここに、 $P_s$ :サクシオン応力、 $c$ 粘着力、 $S_r$ :飽和度、 $S_{r0}$ :残留飽和度、 $s$ :サクシオン、 $\phi_{net}$ :基底応力に基づく内部摩擦角(実用上は有効応力に基づく内部摩擦角とほぼ等しい)

式(1)は水分特性に基づく推定式であるが、現場の試料を用いて一面せん断試験により不飽和状態での粘着力増分を求める方法<sup>4)</sup>も提案されている。

## 3. 飽和度と粘着力関係の応力-浸透連成解析への導入

連成解析は微小変形理論に基づく有限要素法で実施されることが多いが、形状変化による密度が時々刻々と変化する斜面の崩壊現象を再現するには問題があると思われる。斜面崩壊現象を大変形挙動として捉える場合、本報では、大変形理論<sup>5)</sup>に基づく有限差分法コードFLAC<sup>3D</sup>の適用が有効であると考えられる。定式化は文献2)、5)を参照されたい。

解析検討ケースは表-1に示すように、降雨による飽和領域発生状況の相違によりCase AとCase Bに分け、それぞれに

対して飽和度と粘着力の関係を考慮する場合としない場合を比較し、考慮する場合の効果を検討した。解析モデルは図-1に示すように、斜面の第一層(強風化シルト岩)のみをMohr-Coulomb則に基づく弾塑性体でモデル化し、応力は有効応力として取り扱う。表-2に力学的、水理学的特性を示す。力学的境界条件は、解析モデル底面は完全固定、側面は水平方向固定とした。水理学的境界条件は、地表および右側面を排水境界、底面および左側面を不透水境界とした。降雨強度は50(mm/h)として、崩壊により要素の歪みが制限に到達した時点で解析を停止させた。サクシオンと有効飽和度の関係より求めた飽和度と粘着力の関係<sup>4)</sup>を図-2に示す。Case Aの結果を図-3に、Case Bの結果を図-4に示す。崩壊の様相を示す図中の(b)、(c)は、計算が停止した時点の状況を示す。

表-1 解析検討ケース

|            |       | 飽和領域が地表から降下する場合 | 水位が表層底面から上昇する場合 |
|------------|-------|-----------------|-----------------|
| 飽和度と粘着力の関係 | 考慮する  | Case A-1        | Case B-1        |
|            | 考慮しない | Case A-2        | Case B-2        |

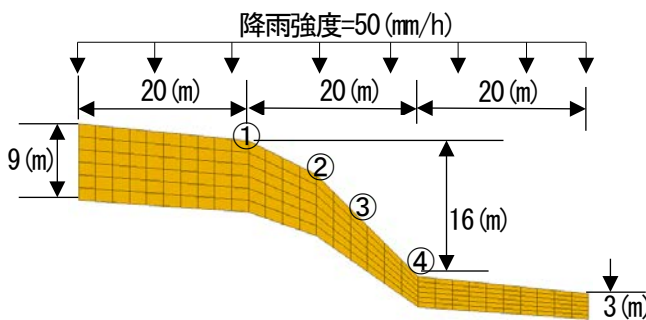


図-1 解析モデル (○数字は地表での水平変位記録点)

表-2 力学的、水理学的特性

|                                  | Case A               | Case B               |
|----------------------------------|----------------------|----------------------|
| 透水係数 $k$ (cm/sec)                | $3.0 \times 10^{-3}$ | $5.0 \times 10^{-3}$ |
| 間隙率 $n$ (%)                      | 20                   |                      |
| 弾性係数 $E$ (MPa)                   | 200                  |                      |
| ポアソン比 $\nu$                      | 0.3                  |                      |
| 質量密度 $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> ) | 1700                 |                      |
| 粘着力 $c$ (kPa)                    | 10                   |                      |
| せん断抵抗角 $\phi$ (deg)              | 40                   |                      |

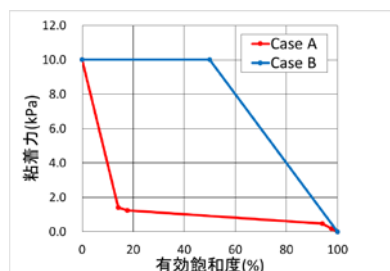
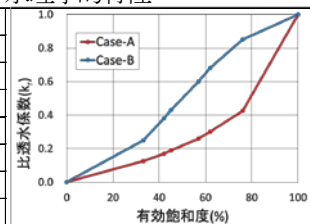
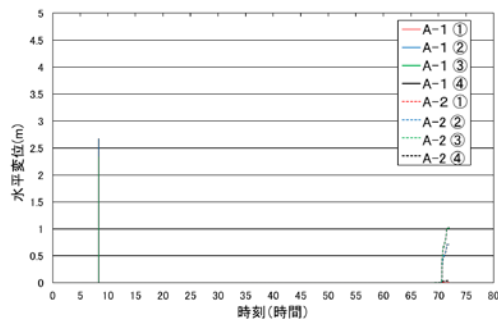


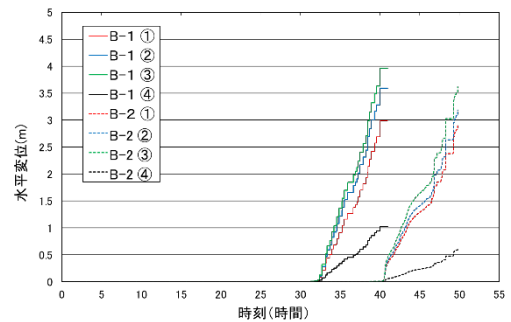
図-2 飽和度と粘着力の関係<sup>4)</sup>

キーワード 斜面崩壊, 集中豪雨, 不飽和特性, 強度低下, 連成解析, 大変形理論

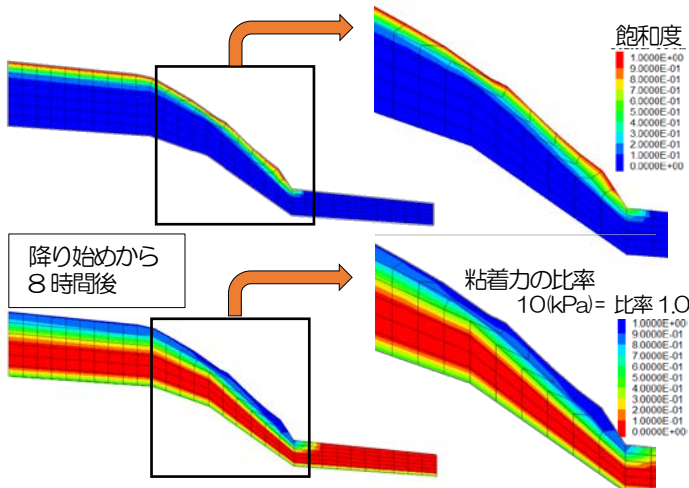
連絡先 〒532-0011 大阪市淀川区西中島5丁目7-19 (株)地層科学研究所 [nakagawa@geolab.jp](mailto:nakagawa@geolab.jp)



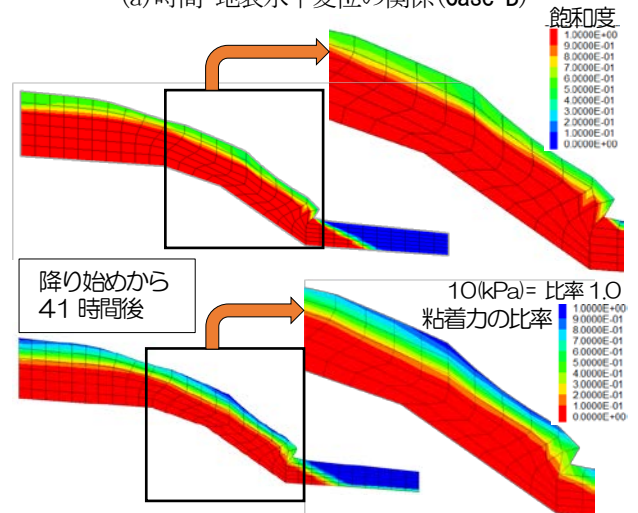
(a) 時間-地表水平変位の関係 (Case A)



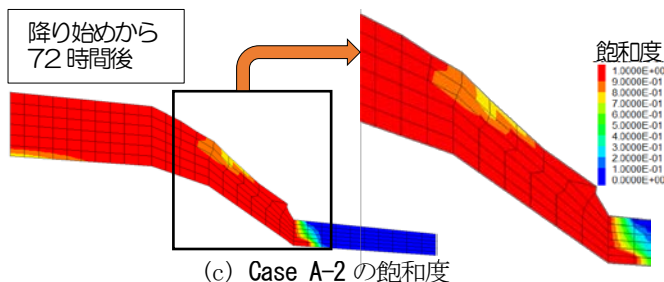
(a) 時間-地表水平変位の関係 (Case B)



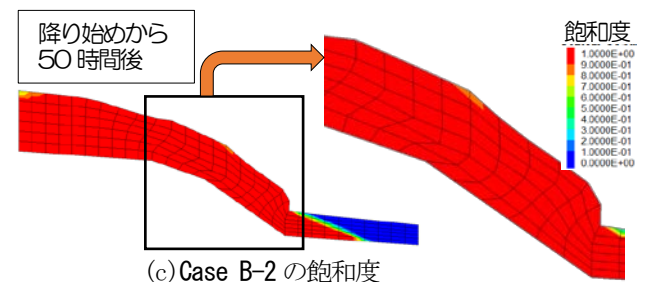
(b) Case A-1 の飽和度と粘着力の比率



(b) Case B-1 の飽和度と粘着力の比率



(c) Case A-2 の飽和度



(c) Case B-2 の飽和度

図-3 解析結果 Case A

図-4 解析結果 Case B

これより、飽和領域発生状況の相違にかかわらず、飽和度上昇による粘着力低下を考慮した Case A-1, Case B-1 は、考慮しない Case A-2, Case B-2 に比較して早期に崩壊（要素の降伏に続く過大な歪みと解析停止）が発生する結果が得られている。Case A-2 は崩壊までに 72 時間を要し、あまり現実的ではない印象を与える。崩壊形態に着目すると、Case A-1 では飽和した表層付近で崩壊が発生し、いわゆる表層崩壊の様相を呈しているが、Case A-2 では深部まで崩壊している。Case B-1, Case B-2 は、どちらの場合も深部まで崩壊している様相を呈している。崩壊の兆候がみえてから崩壊に至るまでに要する時間に着目すると、Case A は数秒～数分であるが、Case B では数時間を要する結果が得られている。

#### 4. おわりに

豪雨時斜面を対象とした連成解析において、飽和度上昇による粘着力低下の考慮の有無により崩壊の形態や開始時間にかなりの相違が見られた。また、表層崩壊を再現するには粘着力低下の考慮は重要な因子であることを示唆する結果

が得られた。今後は、ハザードマップ作製にも有用な広域中山間地を対象とした 3 次元解析を進める予定である。

#### 参考文献

- 1) 杉井俊夫, 加藤正司: 豪雨時における斜面崩壊のメカニズムと危険度予測, 土と基礎 51-8(547), pp.61-66, 2003.
- 2) 蔣 宇静, 田中 利典, 季 博, 杉本知史, 中川光雄: 応力-浸透連成解析に基づく斜面崩壊メカニズムの解明と適用, 資源・素材学会誌 Vol128, pp. 463-470, 2012.
- 3) 加藤正司, 吉村優治, 河井克之, 寸田 亘: 不飽和土の一軸圧縮試験時の強度特性に及ぼすサクシヨンの影響, 土木学会論文集, No.687/III-56, pp.201-218, 2001.
- 4) 鏡原聖史: 豪雨による自然斜面の表層崩壊メカニズムおよび対策に関する研究, 神戸大学学位論文, 甲第 6432 号, 2015.
- 5) 中川光雄, 蔣 宇静, 江崎哲郎: 大変形理論の岩盤挙動および安定性評価への適用, 土木学会論文集, No.575/III-40, pp.93-104, 1997.