

数値実験による降雨浸透時の斜面崩壊形態の観察

Numerical observation of slope failure due to rainfall infiltration

○木山正一・小林 晃・青山咸康
KIYAMA S., KOBAYASHI A. and AOYAMA S.

1. はじめに

降雨が誘因となり発生する斜面崩壊プロセスのシミュレーションツールを作成した。以下ではその構成を概説し、例題を通して斜面崩壊現象のモデルパフォーマンスを述べる。

2. モデル化

地盤を3相系多孔質体とみなし、各相について有限要素法を用いて定式化する。固相の浸透による変形は本研究の最重要問題であるが、ここでは向後が提案する等価間隙圧式を有効応力の原理に適用し¹⁾、弾塑性体の修正カムクレイモデルを実装した速度型釣り合い方程式を updated Lagrange 法で表す。間隙2流体はそれぞれ Darcy 流を基本とするが、地すべりなどで観測される高間隙比状態での液状・泥流挙動を表現するため、Navier Stokes の式を考慮した。別途質量保存則を与え、以上の式を連成して数値計算する。

浸水により斜面崩壊する例題を解くために次の条件付けを行う²⁾。等価間隙圧式に含まれる材料パラメータは、不飽和状態で小さめの有効応力値となるようにする。高間隙比状態では、スラリー化による粘性流動が現れることも考えられる。この場合 Darcy 則による記述に限界があるため、せん断応力を陽に考慮した液相の運動方程式を導入する(次式)。ただし物質収支は顕著に起こらず、液相密度の時間変化率は無視できるものと仮定した。

$$A_{ws} \cdot (v_w - v_s) + \frac{\partial}{\partial x} \{nS_r(u_w I + \tau_w)\} + \rho_w f_w = 0$$

ここで A_{ws} は透水係数の逆比に関係し Darcy 流に寄与する。一般に高間隙比状態では高透水なため A_{ws} は十分小さな値となる。通常多孔質体流れではせん断応力 τ_w はゼロ扱いで透水係数とその効果を含むが、高間隙比な泥流運動では非ゼロとなる。このせん断応力勾配は流体運動の減速と運動範囲の拡散効果を与える。粘性抵抗の高い泥流と化せば液相の流速はある有限の大きさに留まり、上式左辺第二項が支配的な流体運動を始める。

3. 斜面崩壊シミュレーション

予め浸水時の単位体積重量変化に配慮した斜面安定計算(ビショップ法)から安全率 0.9 位となる条件を見つけておく。36 要素・135 節点と小規模な有限要素構造物(図1)であるが、均一サクション場から地下水のある不飽和地盤を作成する(図2)。続いて最大降雨強度(28.8mm/h)に比べ十分高い最終浸透能を有する地盤に降下浸透流速境界条件を地表へ一様に与える。また地表は飽和状態で自由排水境界、終始完全排気とする。また基盤および斜面上側面は非排水・非排気である。以下では泥流化の有無について数値実験考察する(順に泥流、Darcy 流)。飽和透水係数は間隙比 1 のとき 1.0^{-3} (cm/s)、間隙比 1.1 を越えて泥流化した場合に粘性率 10 (Ns/m²) (トマトケチャップ程度) を与えた²⁾。

降下浸透が進むと Darcy 流では泥流より早期に急速変形し（図 3 b 青）、斜面表層のメッシュが大きくせん断変形し斜面崩壊する。このとき液相の Darcy 流速は急激に上昇するが、泥流（図上 NS）では液相の高速流化が抑制されている（図 4）。Darcy 流では斜面崩壊時に斜面麓下のみを高間隙比領域が表層浅く分布する（図 5 赤）。一方泥流では、高間隙比域が地下水位上昇と共に斜面を上向き移動し、深部まで大規模な崩壊が発生している（図 7）。表層付近では浸水により固相のせん断応力が単調減少し、やがて液相のそれを下回る（図 6）。これは表面流による駆動力が表層抵抗力を上回り土石流化したことを意味する。また液相のせん断応力が高間隙比化を助長し、Darcy 流には見られない挙動が発生する（図 9）。いずれの場合も降雨浸透による表層側の進行性体積膨潤が観察され、有効応力径路は塑性軟化により急激な有効応力低減を示し、斜面崩壊に至る様子が理解できる（図 8）。

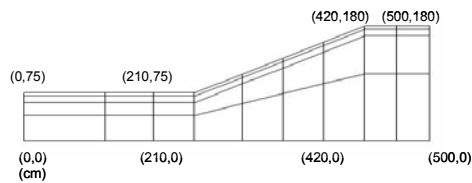


図1 斜面構造物のFEメッシュ

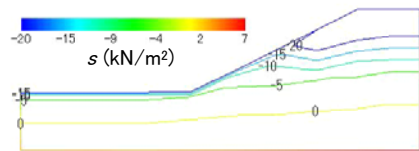


図2 初期サクシオン分布

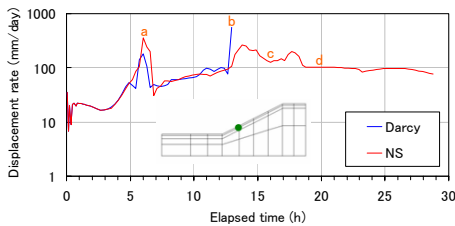


図3 表層斜面の変位速度挙動

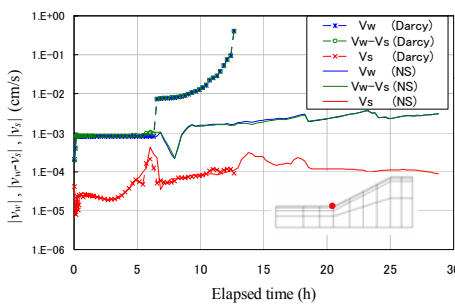


図4 表層斜面下端の固・液・相対速度挙動

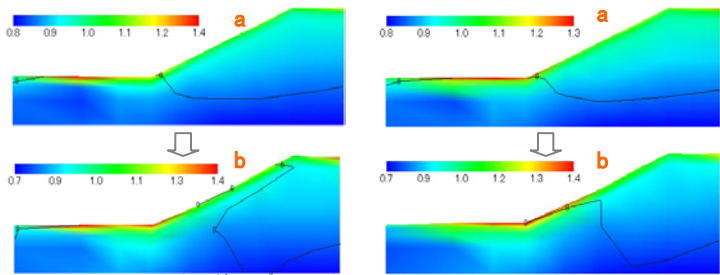


図5 Darcy流での間隙比分布 (黒線は $s = 0$)

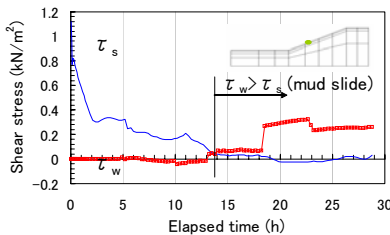


図6 泥流化でのせん断応力

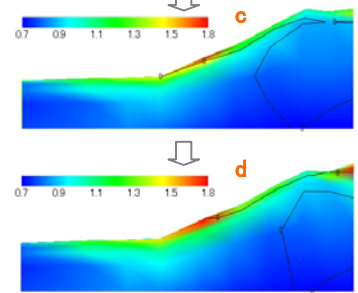


図7 泥流遷移を考慮した間隙比分布

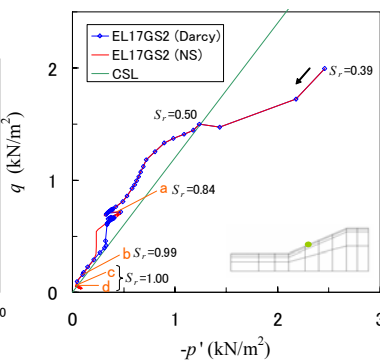


図8 有効応力径路

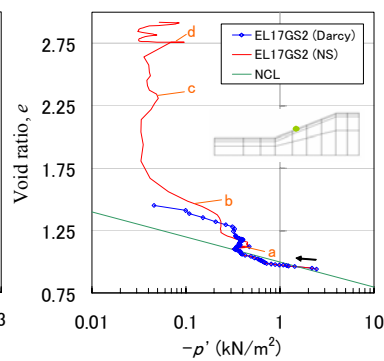


図9 間隙比挙動

4. おわりに

以上の数値実験条件は限定的ではあるが、浸透により異なるタイプの斜面崩壊現象が発生することがわかる。今後はモデルを検証し実用のため大型構造計算化が課題となる。

参考文献 1) 向後：不飽和土の土質力学特性と土質構造物の安定性に関する研究，農業工学研究所報告第 34 号，pp. 39-162, 1995. 2) 木山，小林，青山：地すべりに及ぼす不飽和地盤特性に関する数値実験，平成 16 年度京都大学防災研究所研究発表講演会要旨（2005 年 2 月），http://www.dpri.kyoto-u.ac.jp/web_j/hapvo/05/gh16_poster.html.