

## 第 部門

## 豪雨時における降雨強度に着目した斜面の浸透特性に関する解析的研究

京都大学工学部 学生員 ○長野 航兵  
 京都大学大学院 工学研究科 正会員 小山 倫史  
 (株)建設技術研究所 大阪支社 正会員 李 圭太  
 京都大学大学院 工学研究科 正会員 大西 有三

## 1. はじめに

近年、梅雨前線や台風、異常気象などによる豪雨に起因する斜面崩壊が数多く発生している。降雨に起因する斜面崩壊のうち、雨水浸透により地盤の表層付近の飽和度が上昇し、自重の増加や有効応力の低下によっておこる表層崩壊は、短時間に局所的に降る豪雨、いわゆる「ゲリラ豪雨」によって発生する場合が多い。従来の浸透流解析において用いられる降雨強度は、時間雨量であり、ゲリラ豪雨のような短時間に多量に降る雨の場合、降雨強度が平均化され、雨水浸透や斜面安定に与えるインパクト（飽和度の増大、サクション圧の変化、有効応力の低下など）が過小評価されてしまう可能性がある。そこで、本研究では、降雨強度に気象庁計測の10分毎降雨量と時間降雨量を用いて有限要素法（FEM）による2次元飽和-不飽和浸透流解析を実施し、降雨強度の与え方の違いが雨水浸透さらには斜面安定にどのような影響を及ぼすのかについて検証を行った。

## 2. 飽和-不飽和浸透流解析の支配方程式

飽和不飽和浸透流解析の支配方程式は、質量保存則による連続式とダルシー則から導出される式を、不飽和領域にまで拡張した次式となる。

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left( K_r(\theta) \left( K_{ij}^s \frac{\partial \psi}{\partial x_j} + K_{i3}^s \right) \right) - q = (\alpha S_s + \beta c(\psi)) \frac{\partial \psi}{\partial t} \quad (1)$$

$i, j=1, 2, 3$  (1:x, 2:y, 3:z)

ここに、 $K_s$ : 飽和透水係数、 $K_r$ : 相対透水係数比、 $\psi$ : 圧力水頭、 $q$ : 体積内の単位体積当たりのシンク/ソース流量(排水時、 $q > 0$ )、 $S_s$ : 比貯留係数、 $\alpha$ : 飽和領域=1 不飽和領域=0、 $c(\psi)$ : 比水分容量、 $\beta$ : 飽和領域=0 不飽和領域=1 である。

## 3. 雨水浸透の数値解析

## 3.1 解析モデル

斜面勾配は 1:3 の斜面を用いる。また、降雨境界について、本研究では地表面の内側（25cm）に仮想境界層を設け、その要素の下面を流入点、上面を浸出点とし、降雨は流入点において仮想境界層下面に配置された節点に流入量を固定することで与えられるものとした。仮想境界層の上面は浸出面境界とし、

降雨境界での水収支（すなわち、地中に浸透していく量と地表付近を流れる量）を仮想境界層の水の流入入により行う境界を提案する(図1)。

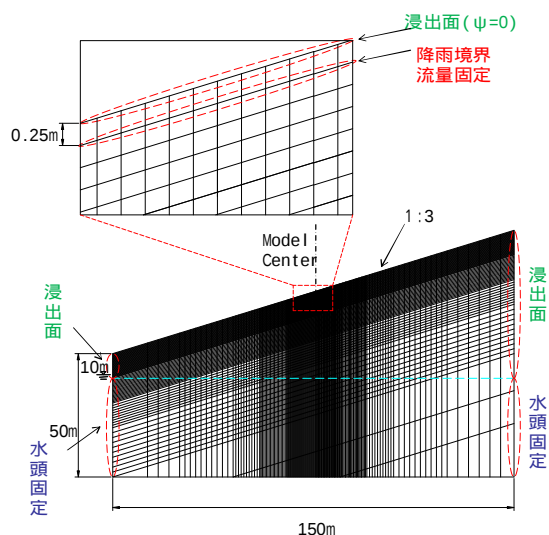


図1. 解析メッシュ図および境界条件模式図

## 3.2 地盤の不飽和特性

不飽和特性は式(2)の van Genuchten モデルを適用し、各パラメータは既往文献<sup>1)</sup>より、透水係数  $k = 2.89 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ 、残留体積含水率  $\theta_r = 0.078$ 、飽和体積含水率  $\theta_s = 0.394$ 、フィッティングパラメータ  $\alpha =$

$0.036\text{cm}^{-1}$  ,  $n=1.56$  と設定した .

$$\text{有効飽和度 } S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (2)$$

$$S_e = \left\{ 1 - (-\alpha^* \psi_m)^n \right\}^m \quad m = 1 - 1/n \quad (n > 1, 0 < m < 1) \quad (3)$$

$$\text{比透水係数 } k_r = S_e^{1/2} \left\{ 1 - \left( 1 - S_e^{1/m} \right)^m \right\}^2 \quad (4)$$

### 3.3 降雨強度

降雨強度として気象庁が計測した , 「平成 20 年 8 月末豪雨」における , 平成 20 年 8 月 28-29 日の愛知県一宮市での 10 分毎降雨量と時間降雨量を用いた . なお , 時間降雨量について , その 1 時間の取り方は気象庁計測のデータにあわせているが , 10 分毎にずらして時間降雨量を求めても降雨量のピークに大きな差はなく , 総降雨量は同じである .

### 3.4 解析結果

解析結果として斜面の解析モデル中央部の地表面付近に形成される飽和領域の位置 ( 深さ ) の経時変化を示す ( 図 2 ) . 本図より , 用いる降雨強度が 10 分毎降雨量と時間降雨量とでは , 豪雨時の雨水浸透挙動に大きな違いがみられる . 特に , 時間降雨量を用いた場合は , 降雨強度が平均化され , 時々刻々変化する降雨に対応できず , 飽和領域の形成などの応答がより遅くなる傾向がある . このことから , これまでの時間降雨量を降雨強度として用いる方法は , ゲリラ豪雨のような短時間に局所的に多量に降る雨には十分に対応できないということが明らかである .

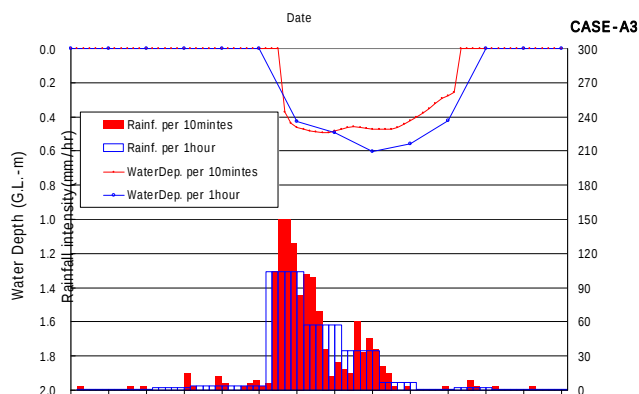


図 2 . 飽和領域の位置 ( 深さ ) の経時変化と降雨量  
グラフ

また , 降雨浸透により表層付近に形成される飽和

領域の深さが最大となった位置を滑り面と仮定して安定解析を行った . 式(5)で表される長大斜面の安全率の計算式に  $\gamma_{\text{sat}}=18 \text{ kN/m}^3$  ,  $\gamma_w=9.8 \text{ kN/m}^3$  ,  $\alpha = 18.43^\circ$  ,  $H=0.49 \text{ m}$  ,  $c=10 \text{ kN/m}^2$  ,  $\phi=0^\circ$  を代入し , 安全率が 3.779 となった . この結果から , 飽和域においてすべり破壊が生じない結果となっている . 本研究では結果図を紙面の都合上割愛するが , 法面勾配を 1:1 のケースにおいても検討を実施しており安全率が 2.364 となった . これより粘着成分が主体となる地盤においては従来のすべり安定性による慣用法だけでなく , 弾塑性法を用いた FEM 安定解析による安定性検討手法が必要と考えられる .

$$F = \frac{P' \tan \phi + cl}{S} = \frac{\gamma_{\text{sat}} - \gamma_w}{\gamma_{\text{sat}}} \cdot \frac{\tan \phi}{\tan \alpha} + \frac{c}{\gamma_{\text{sat}} H} \cdot \frac{1}{\cos \alpha \sin \alpha} \quad (5)$$

### 4 . まとめ

本研究では , 短時間に多量に降る雨を対象とした浸透流解析において , 降雨強度の与え方の違い (10 分毎降雨量と時間降雨量) が雨水浸透挙動にどのような影響を与えるのか調べた . 解析結果より , 降雨強度の違いにより , 時間降雨量を用いた場合は , 降雨強度が平均化され , 地表面付近の飽和領域の形成などの応答が遅くなる傾向があることが分かった . 地表面付近の飽和領域の形成や表面浸出流量の変化は地盤内に作用する圧力水頭 ( サクション圧 ) の変化や飽和度の変化に伴う自重の変化に大きな影響を与え , 地盤表層付近における急激な圧力水頭の変化や自重の増加は表層崩壊を引き起こす原因となると考えられる . このことから地盤内の地表面付近の飽和領域の形成や表面浸出流量をより正確に捉えることは豪雨時での斜面の表層崩壊のメカニズム解明に大きく貢献するものと考えられる

### 参考文献

- 1) Brooks, R. H. and Corey, A. T. : Hydraulic Properties of Porous media , Hydrol. Pap. No.3 , Colorado State Univ. , Fort Collins , 1964.