

# 浸透流解析と剛塑性有限要素法を組み合わせた斜面の安定解析

数値解析 盛土 浸透・崩壊実験

早稲田大学 学生会員 ○須田 健太郎  
 早稲田大学 学生会員 安藤 悠  
 早稲田大学 国際会員 赤木 寛一  
 東京地下鉄株式会社 国際会員 小西 真治  
 公益財団法人 鉄道総合技術研究所 正会員 仲山 貴司

## 1. はじめに

近年、集中豪雨による土砂崩れが各地で報告されており、被害を最小限とするための備えが必要となっている。また、斜面崩壊については、斜面の一部で局所的崩壊が発生し、その後、崩壊が進行して大規模崩壊につながる進行性破壊が問題となっており、崩壊メカニズムを解明する研究がおこなわれている。降雨による盛土や斜面の崩壊は、雨水の浸透によるサクシヨンの減少に伴うせん断強度の低下、自重の増加、地下水水位の変動等の複合的な要因で引き起こされると考えられている。そこで著者らは剛塑性有限要素法を用いて、これらの影響を考慮した斜面安定解析を実施し、対策工の評価や特別警戒情報システム、および深層崩壊にも適用できるような合理的シミュレーション手法を検討している。

このうち本論文では、図-1 に示すように飽和・不飽和浸透流解析と剛塑性有限要素法解析を組み合わせた手法を考案し、その妥当性を既往の室内土槽実験と比較検討した結果を報告する。

## 2. 浸透と不飽和土の特性を考慮した剛塑性解析

図-1 に示した本手法の流れのうち、浸透水圧の算定方法および剛塑性有限要素法について示す。

### (1) 浸透水圧に対応する等価節点外力の算定方法

地盤を分割した要素内の任意点の圧力水頭と浸透水圧の関係を要素内で Gauss 積分して、各節点の浸透水圧に相当する等価節点外力を求める。

$$\{\gamma_w \cdot i\} = \gamma_w \cdot \begin{Bmatrix} -\frac{\partial h}{\partial x} \\ -\frac{\partial h}{\partial y} \end{Bmatrix} = \gamma_w \cdot \begin{Bmatrix} -\sum_{j=1}^n \frac{\partial N_j}{\partial x} h_j \\ -\sum_{j=1}^n \frac{\partial N_j}{\partial y} h_j \end{Bmatrix} \quad \begin{cases} f_x = -\int_{\Omega} N^T \gamma_w \frac{\partial h}{\partial x} d\Omega \\ f_y = -\int_{\Omega} N^T \gamma_w \frac{\partial h}{\partial y} d\Omega \end{cases} \quad \dots(1)$$

ここに、 $\gamma_w$ ：水の単位体積重量、 $i$ ：動水勾配、 $h$ ：圧力水頭、 $N$ ：形状関数、 $n$ ：節点数、 $f_x$ 、 $f_y$ ：等価節点外力、 $\Omega$ ：積分範囲

### (2) 剛塑性有限要素法

剛塑性有限要素法とは、地盤が塑性流動する際の応力の釣合条件、ひずみ速度の適合条件を上界定理等で解き、破壊時の①応力分布、②変位速度分布、③荷重係数  $\mu$  を求めるものである。著者らの手法では、降伏基準には Mohr-Couomb 則、塑性流れには Drucker-Prager 則を適用している<sup>1)</sup>。この解析は、遠心力載荷試験で破壊時の遠心加速度  $\mu \times g$  ( $g$ ：重力加速度) を求めるのと類似している。つまり、荷重係数  $\mu=1$  が通常重力場を表しており、1 以上で地盤は安定、1 未満で地盤は崩壊と判定することができる。

## 3. 解析概要

北村らによる室内土槽試験<sup>2)</sup>は、模型しらす斜面を作製し、浸透・崩壊状況を斜面の上面、背面、底面から注水して観察したものである。図-2-a) に示すように、地盤内部にはテンシオメータ、底面に間隙水圧計が設置され、間隙水圧の経時変化を計測している。このうち本研究では、上面注水した実験結果を解析対象とし、浸透・崩壊実験結果と今回提案する解析手法による結果を比較検討した。

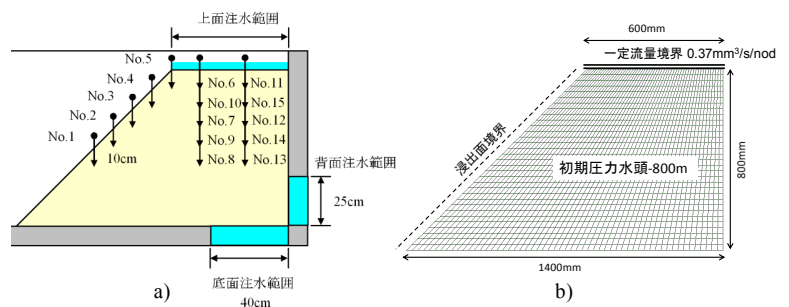


図-2 盛土斜面<sup>2)</sup>

Slope Stability Analysis by coupling Seepage Analysis and rigid plastic FEM analysis

Kentaro Suda, WASEDA University  
 Yu Ando, WASEDA University  
 Hirokazu Akagi, WASEDA University  
 Takashi Nakayama, Railway Technical Research Institute  
 Shinji Konishi, Tokyo Metro Co., Ltd.

#### 4. 解析条件及び解析結果

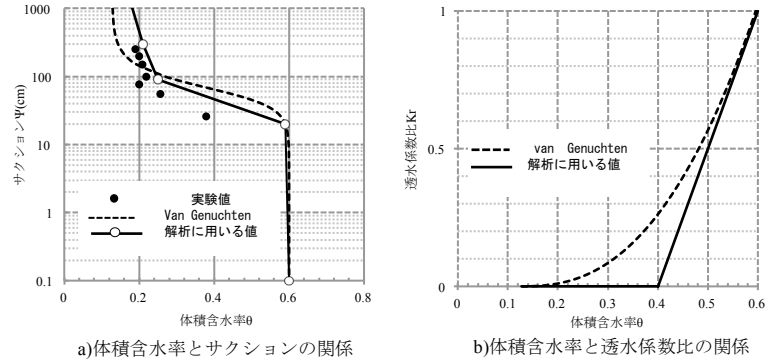
##### (1) 飽和不飽和浸透流解析

###### a) 解析条件

対象となる実験結果の解析モデルは、図-2-b)に示すような盛土斜面であり、4 節点 4 角形要素を用いており、要素数は 1792、節点数は 1881 とした。また、上面注水であるので境界条件は、図に示すように法面に浸出面境界、上面に一定流量境界を設けた。実験条件より、要素の初期圧力水頭は-800mm で一様とし、流量境界値を 0.37mm<sup>3</sup>/s/nod とした。表 - 1 に用いた地盤条件を示す。また、不飽和浸透特性に関しては、実験データと Van Genuchten 式を参考にし、図-3-a),図-3-b)のように決定した。

表-1 地盤条件

水の単位体積重量 $\gamma_w$ (kN/m <sup>3</sup> )	9.81	一般値
土粒子の単位体積重量 $\gamma_s$ (kN/m <sup>3</sup> )	24.00	実験値
地盤の乾燥重量 $\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	9.34	
間隙比 $e$	1.57	
内部摩擦角 $\phi$ (°)	38.0	
飽和透水係数 $k$ (mm/sec)	$4.83 \times 10^{-2}$ (飽和度 93.2%)	
比貯留係数 $S_s$ (1/mm)	$1.00 \times 10^{-5}$	推定値
飽和時の粘着力 $c$ (kN/m <sup>2</sup> )	0.0	



###### b) 解析結果

図-4には浸透力ベクトル分布(図中の数値は浸透力の最大値), 図-5には見かけの粘着力の経時変化を示している。図-6, 図-7には、実験による間隙水圧の測定結果と浸透流解析の結果を示しているが、降雨に相当する上面注入に伴う実験の盛土斜面内の浸透状況を再現できたと言える。

##### (2) 剛塑性有限要素法解析

###### a) 解析条件

飽和不飽和浸透流解析と同様の図-2-b)の解析モデルを使用し、境界条件は底面を鉛直水平固定、側面は水平固定とした。飽和不飽和浸透流解析から得られた浸透水圧、見かけの粘着力、単位体積重量を剛塑性解析に入力した。

###### b) 解析結果

図-6 に示した実験で観測された崩壊時期と、図-8 の解析で得られた荷重係数  $\mu$  の変化を比較する。なお、解析結果においては、荷重係数  $\mu$  が 1 を下回るときに崩壊すると判断できる。図-6 および図-8 より、荷重係数  $\mu$  が極小値 ( $\mu=0.81$ ) となる経過時間 110min のときは、実験での法先の崩壊発生時期 110min と対応しており、この時に図-4 示した浸透力の最大値が法先で発生している。次に、経過時間 120min のときに再び荷重係数  $\mu$  が急激に低下 ( $\mu=0.22$ ) しており、実験における 115min の法面全体の崩壊発生時期に対応している。また、この時に、図-5 より斜面内の見かけの粘着力が大きく低下していることがわかる。

##### 5. おわりに

浸透流解析と剛塑性有限要素法を組み合わせた斜面の安定解析により、別途行われた土槽実験における法先の崩壊および法面全体の崩壊とほぼ対応する結果が得られた。なお、本研究の実施にあたり、鹿児島大学北村先生、酒匂先生には貴重な実験データをご提供頂いたことをここに記し、感謝を表す。

##### 参考文献

- 1) 小西真治・仲山貴司・田村武・豊田浩史・松長 剛・井浦智実：地下水および飽和度による粘着力の変化を考慮した切羽安定評価法，土木学会論文集 F, Vol.69, pp.1-9,2013
- 2) 北村良介、酒匂一成、加藤俊二、水島俊基、今西肇：降雨時のしらす斜面の浸透・崩壊に関する室内土槽試験、地盤工学ジャーナル、Vo.2、No.3、pp.149-163

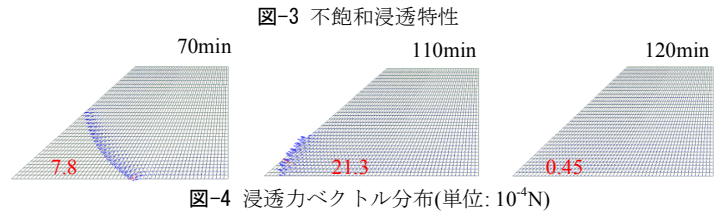


図-4 浸透力ベクトル分布(単位:  $10^{-4}N$ )

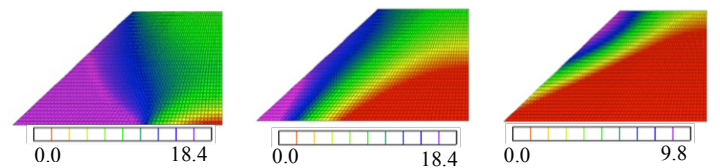


図-5 見かけの粘着力 (単位: kN/m<sup>2</sup>)

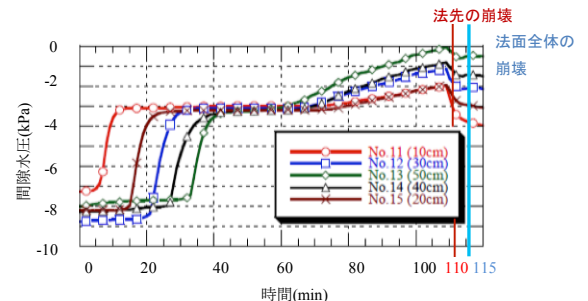


図-6 間隙水圧の測定結果

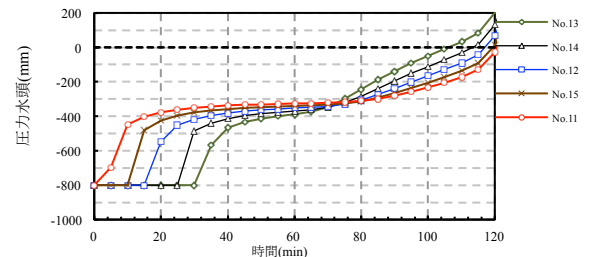


図-7 圧力水頭の解析結果

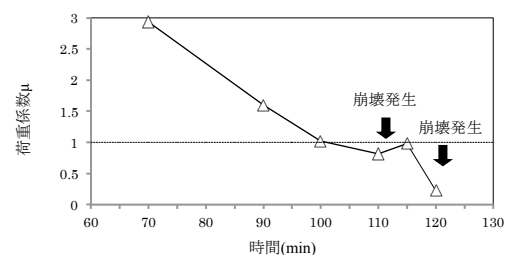


図-8 荷重係数  $\mu$  の変化