

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斜面安定解析

盛土 数値解析 浸透・崩壊実験

早稲田大学 学生会員 ○安藤 悠
 早稲田大学 学生会員 須田 健太郎
 東京地下鉄株式会社 国際会員 小西 真治
 早稲田大学 国際会員 赤木 寛一

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。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ジョンの減少に伴うせん断強度の低下、自重の増加、地下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¹⁾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、特別警戒情報システムおよび対策工の評価や深層崩壊にも適用できるような合理的の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²⁾と比較検討した結果を報告する。

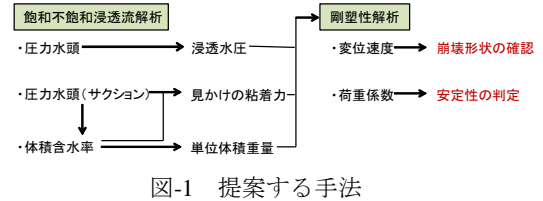


図-1 提案する手法

2. 浸透と不飽和土の特性を考慮した剛塑性解析

(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。

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

ここに、 γ_w : 水の単位体積重量、 i : 導水勾配、 h : 圧力水頭、 N : 形状関数、 n : 節点数、 f_x 、 f_y : 等価節点外力、 Ω : 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 μ を求めるものである。著者らの手法では、降伏基準には Mohr-Coulomb 則、塑性流れには Drucker-Prager 則を適用している¹⁾。この解析は、遠心力载荷試験で破壊時の遠心加速度 $\mu \times g$ (g : 重力加速度) を求めるのと同様である。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²⁾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、全注水条件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。

4. 解析条件及び解析結果

(1) 飽和・不飽和浸透流解析

底面注水については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

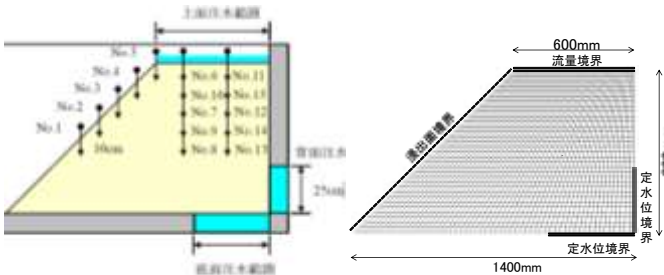


図-2-a) 盛土斜面

図-2-b) 解析モデル

表-1 地盤条件

	底面注水	背面注水	上面注水	
水の単位体積重量 γ_w (kN/m ³)	9.81	9.81	9.81	一般値
土粒子の単位体積重量 γ_s (kN/m ³)	24.04	24.00	24.00	実験値
地盤の乾燥重量 γ_d (kN/m ³)	9.35	9.72	9.34	
間隙比 e	1.57	1.47	1.57	
内部摩擦角 ϕ (°)	38.0	38.0	38.0	
飽和透水性係数 k (mm/sec)	5.75×10^{-2}	1.87×10^{-2}	4.83×10^{-2}	
比貯留係数 S_s (1/mm)	1.00×10^{-5}	1.00×10^{-5}	1.00×10^{-5}	推定値
飽和時の粘着力 c (kN/m ²)	0.0	0.0	0.0	

Slope stability Analysis by coupling Seepage Analysis and Rigid plastic FEM

Yu Ando, WASEDA University
 Kentaro Suda, WASEDA University
 Hirokazu Akagi, WASEDA University
 Shinji Konishi, Tokyo Metro Co., Ltd.

いており、要素数は 1792、節点数は 1881 とした。また境界条件は、図に示すように法面に浸出面境界、底面に定水位境界を設け、要素内の初期圧力水頭は-800mm で一様とし、定水位境界値を 250mm とした。**背面注水**の解析モデルは底面注水と同じモデルを用いた。また境界条件は図に示すように法面に浸出境界、底面右端に定水位境界を設け、要素内の初期圧力水頭は-700mm で一様とし、定水位境界値を 250mm とした。**上面注水**の解析モデルは底面注水、背面注水と同じモデルを用いた。また境界条件は、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、要素の初期圧力水頭は-800mm で一様とし、流量境界値を 0.37mm/nod とした。図-3,4,6,7,9,10 に各注水条件での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、両者がほぼ同じ形状になっており全試験条件について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た。また、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

・**底面注水**：図-3 に実験における崩壊時期を、図-5 に荷重係数 μ の推移を示す。荷重係数 μ が 1 を下回るときに崩壊と判断でき、解析結果では 75min で μ が 1 を下回り、100min で極小値をとり、160min で再度 μ が 1 を下回り、200min で 2 回目の極小値をとる。荷重係数 μ が極小値(0.33)となる経過時間 100min は、実験での崩壊発生時期 120min と対応している。また 200min のときに荷重係数 μ が再び極小値(0.02)となり、実験結果と同様に 2 回目の大規模崩壊と対応していることが分かる。**背面注水**：図-6 に実験における崩壊時期を、図-8 に剛塑性解析から得られた荷重係数 μ の変化を示す。図-6 および図-8 を比較すると、荷重係数 μ が極小値 (0.97) となる経過時間 170min のときは、実験における法先の崩壊発生時期 160min と対応していることが分かる。**上面注水**：図-9 に実験における崩壊時期を、図-11 に剛塑性解析から得られた荷重係数 μ の変化を示す。図-8 および図-9 を比較すると、荷重係数 μ が極小値 (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 と対応していることが分かる。また、経過時間 120min のときに再び荷重係数 μ が急激に低下 (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ことが分かる。

5.おわりに

浸透と不飽和土の特性を考慮した斜面の剛塑性有限要素法解析により、別途行われた土槽実験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。

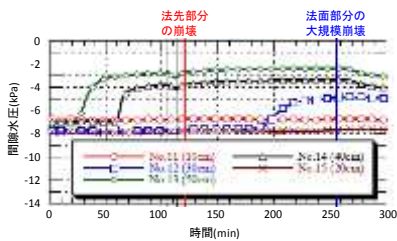


図-3 間隙水圧の測定結果(底面注水)

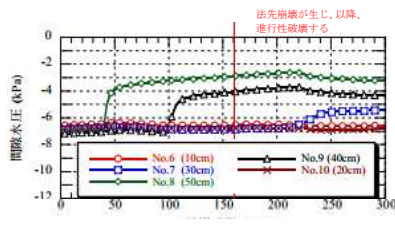


図-6 間隙水圧の測定結果(背面注水)

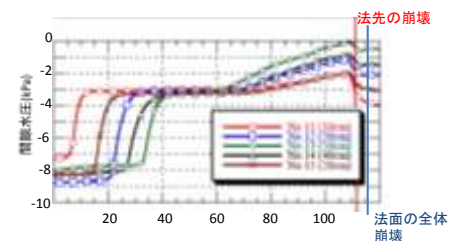


図-9 間隙水圧の測定結果(上面注水)

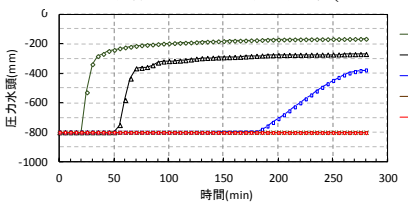


図-4 圧力水頭の解析結果(底面注水)

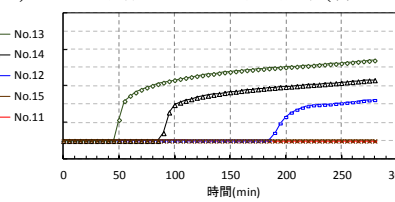


図-7 圧力水頭の解析結果(背面注水)

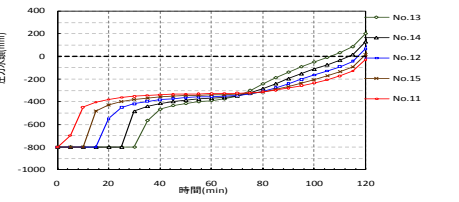


図-10 圧力水頭の解析結果(上面注水)

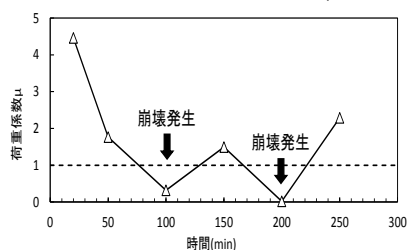


図-5 荷重係数 μ の推移(底面注水)

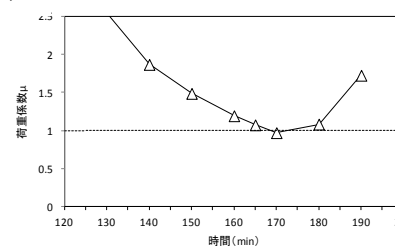


図-8 荷重係数 μ の推移(背面注水)

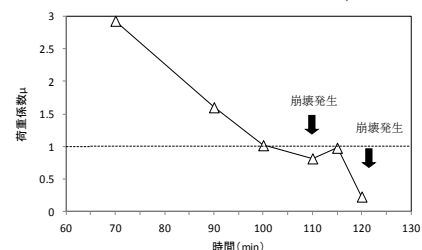


図-11 荷重係数 μ の推移(上面注水)

参考文献

- 1)小西真治：砂と粘性土の相互地盤の切羽安定評価に関する研究，鉄道総研報告書，特別第 45 号，2001
- 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