

タンクモデル法と剛塑性有限要素法を組み合わせた斜面安定解析手法について

剛塑性有限要素法 タンクモデル 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 正会員 小西 真治
 早稲田大学 フェロー会員 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オ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、対策工の評価や避難警報システムに適用できるような合理的な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に示すようタンクモデル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。

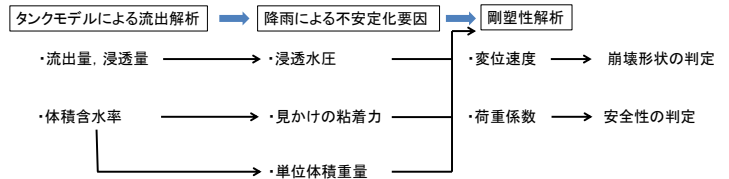


図-1 提案する手法

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⁾。荷重係数 μ は斜面の安定解析における安全率に相当する。つまり、荷重係数 $\mu=1$ が通常の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. 解析対象

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,図-2-b)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。

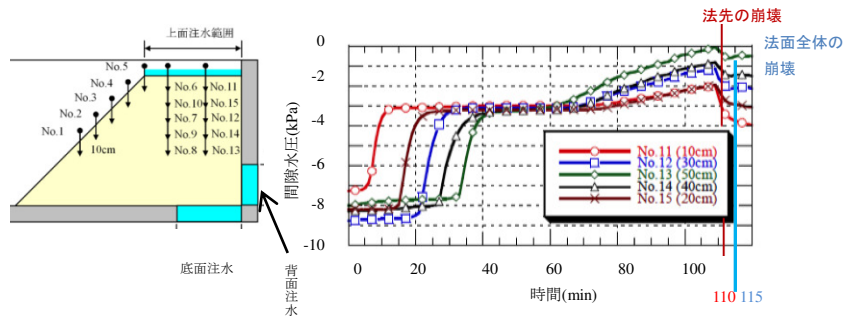


図-2-a) 盛土斜面

図-2-b) 間隙水圧の測定結果

4. 解析条件および解析結果

4.1 タンクモデルによる流出解析

(a) 解析条件

表-1 に解析で用いた地盤条件を示す。対象となる実験結果の解析モデルは、図-3(a)に示すような盛土斜面 FEM メッシュであり、(b)のタンクモデルは一列三段モデルであり、(c)は両者を重ね合わせて表したものである。その際、上部 2 段のメッシュに対応する上部タンクに 2 つ、中央部 2 段のメッシュに対応する中部タンク、下部 2 段のメッシュに対応する下部タンクそれぞれに流出孔を設けた。また今回の解析対象は底面以下には水は浸透しないので下部タンクには浸透孔は設けていない。表-2 には、実験結果とのフィッティングにより求めたこの条件におけるタンクモデルパラメータを示す。降雨条件は、実験条件が上面注水 4.0(L/min)であるので、対応する 32(mm/10min)とした。また初期貯留水 S_0 に関しては、実験条件で得られた初期含水率 θ を 0.32 として設定した。

表-1 地盤条件

水の単位体積重量 γ_w (kN/m ³)	9.81	一般値
土粒子の単位体積重量 γ_s (kN/m ³)	24.00	実験値
地盤の乾燥重量 γ_d (kN/m ³)	9.34	
間隙比 e	1.57	
内部摩擦角 ϕ (°)	38.0	
飽和透水係数 k (mm/sec)	4.83×10^{-2} (飽和度 93.2%)	
比貯留係数 S_0 (1/mm)	1.00×10^{-5}	推定値
飽和時の粘着力 c (kN/m ²)	0.0	

(b) 解析結果

図-4 にはタンクモデルにより算出された上部タンクと中部タンクの体積含水率 θ の経時変化を示す。ここで、体積含水率 θ は各タンクの貯留高を各タンクに相当する高さ(800/3mm)で除すことで算出している。図-5 には、図-2-b)に示す間隙水圧の測定結果をもとに Van Genuchten 式を用いて、実験で測定されたサクシオンの変化を体積含水率 θ の経時変化とした結果を示す。この際、使用した Van Genuchten 式とパラメータ

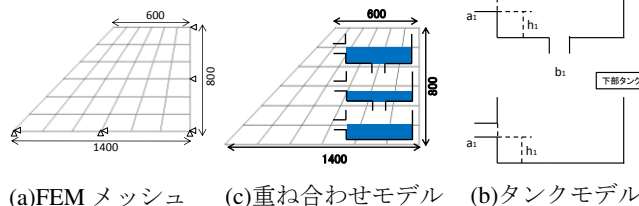


図-3 解析モデル

表-2 タンクモデルパラメータ

係数	上部タンク	中部タンク	下部タンク
S_0	85.3mm	85.3mm	85.3mm
h_1	200mm	140mm	145mm
a_1	0.1	0.23	0.45
h_2	120mm		
a_2	0.1		
b	0.13	0.07	

キーワード：剛塑性有限要素法 タンクモデル 浸透・崩壊実験

連絡先：〒169-8555 東京新宿区大久保 3-4-1 早稲田大学理工学術院赤木研究室 Tel.03-5286-3405

タを以下に示す。

$$Se = \left(\frac{1}{1 + (\alpha \cdot \psi)^n} \right)^m \quad Se = (\theta - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r) \quad (1)$$

ここに、Se：有効飽和度、 θ ：体積含水率、 θ_r ：残留体積含水率、 θ_s ：飽和体積含水率、 ψ ：サクシオン (cm)、 α (1/cm)ⁿ、 m (=1-1/n)：実験定数

ここで、図-3と図-2-b)からおおよそ上部タンクは実験のテンシオメータ No.15、中部タンクはテンシオメータ No.14と対応する位置関係にある。よって、図-4、5においても上部タンクと No.15 の体積含水率 θ 、中部タンクと No.14 の体積含水率 θ を比較することでタンクモデル法による解析結果と実験結果を比較することができる。図-4 に示す解析結果の体積含水率 θ は、浸透開始後すぐに値が上昇するのに対し、図-5 に示す測定結果の体積含水率 θ は立ち上がりのタイミングが遅く、急激に値が上昇していることがわかる。このように浸透初期の斜面内の水の移動が支配的な

60min までは結果に違いが認められるが、斜面内の土がほぼ飽和状態に到達するそれ以降の 60min~120min では両者はほぼ同様の挙動を示している。実験結果の崩壊時刻が 110min、115min であることから 60min~120min の範囲では、降雨の盛土斜面内の浸透状況が再現できていることがわかる。

4.2 剛塑性有限要素法による斜面安定解析

(a)解析条件

図-3-(a)に示す解析モデルを使用し、要素数 36、節点数 49、変位境界条件は底面を鉛直水平固定、側面は水平固定とし解析を実施した。タンクモデル法による流出解析から得られた斜面内要素の浸透水圧、見かけの粘着力、単位体積重量を剛塑性解析に入力した。図-6 に解析に用いた見かけの粘着力の経時変化を示す。また図-7 に斜面内要素の浸透水圧に対応する等価節点外力の分布を示す。浸透水圧はタンクモデルによる解析結果の浸透量と流出量から以下の式を用いて算出した。このとき、流出量はタンク側面全体から生じるものとし水平方向の水の流れと考えることで、(2)式より水平方向の動水勾配を決定した。また同様に、浸透量をタンク底面全体から生じるものとし鉛直方向の水の流れと考えることで、(2)式より鉛直方向の動水勾配を決定した。

$$Q = A \cdot k \cdot i \quad (2) \quad f = \gamma_w \cdot i \quad (3)$$

ここに Q：各タンクの流出量、A：断面積、k：透水係数、i：動水勾配、 γ_w ：9.81×10⁻⁶(N/mm³)、f：浸透水圧(N/mm³)

(b)解析結果

図-2-b)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 μ の変化を比較する。なお、解析結果においては、荷重係数 μ が 1 を下回るときに崩壊すると判断できる。図-8 より、荷重係数 μ が単調に減少して $\mu=0.91$ となって初めて 1 を下回る経過時間 110min は、図-2-b)の実験での法先の崩壊発生時期 110min と対応しており、この時、図-7 より浸透水圧が法先に作用していることがわかる。また、経過時間 120min のときに荷重係数 μ がさらに低下 ($\mu=0.22$) 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-6 より斜面内の見かけの粘着力は大きく低下している。

5.おわりに

タンクモデル法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：地下水圧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
- 3)大津宏康,大西有三,高橋健二：タンクモデル法による斜面の降雨時リスク評価法の研究,建設マネジメント研究論文集, Vol.10.2003

表-3 Van Genuchten 式のパラメータ

α	n	θ_s	θ_r
0.0167	3.116	0.6	0.128

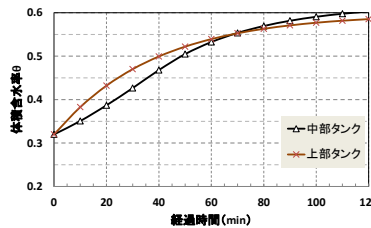


図-4 体積含水率の解析結果

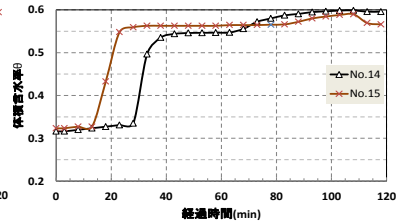


図-5 体積含水率の測定結果

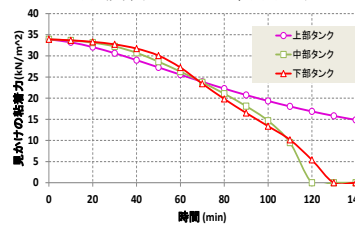


図-6 見かけの粘着力の経時変化

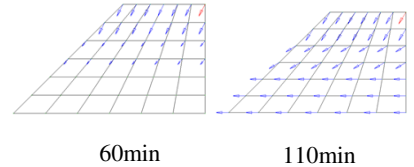


図-7 浸透水圧に相当する等価節点外力

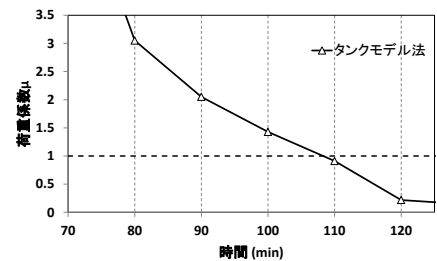


図-8 荷重係数 μ の変化