

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の提案

まさ土 タンクモデル 剛塑性有限要素

早稲田大学 学生会員 ○竹内 佳成
早稲田大学 学生会員 安藤 悠
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に示すような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。

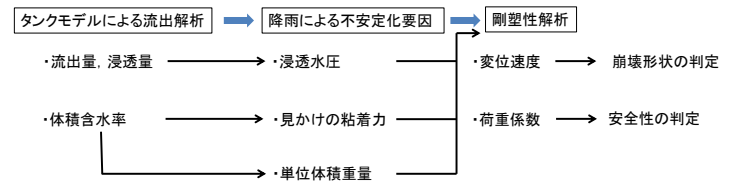


図-1 提案する手法

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、模型まさ土斜面を作製し、浸透・崩壊状況を降雨装置を用いることで降雨を再現し、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。本研究では、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。

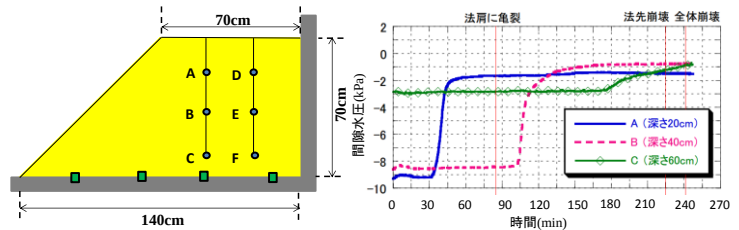


図-2-a) 盛土斜面

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1つ流出孔を設けた。また今回の解析対象は底面以下に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、実験条件が時間雨量 50mm であるので、10 分間雨量に換算し 8.3(mm/10min)とした。また初期貯留水 S_0 に関しては、図-2-(b)の実験結果から得られる実験開始時の間隙水圧から貯留高を算出し、その値を初期貯留高とした。

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)	25.67	実験地
地盤の乾燥重量 γ_d (KN/m ³)	14.95	
間隙比 e	0.72	
内部摩擦角 $\phi(^{\circ})$	18.9	
飽和透水系数 k (mm/sec)	7.02×10^{-9} (飽和度75.3%)	推定値
飽和時の粘着力 c (KN/m ²)	0	

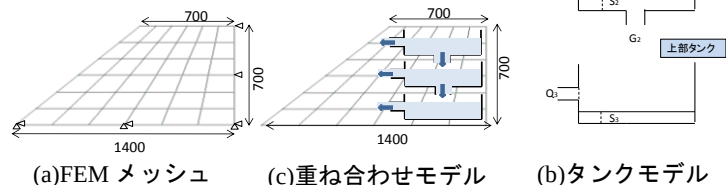


図-3 解析モデル

(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、下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(700/3mm)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ョ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 式とパラメータを以下に示す。

$$S_e = \left(\frac{1}{1 + (a \times \varphi)^n} \right)^m \quad S_e = (\theta - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r) \quad (1)$$

ここに、 S_e :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、 φ :サクション(cm)、 a (1/cm) n m (=1-1/n):実験定数

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	52.32	52.78	67.15
h_1	85	83	102
a_1	0.33	0.08	0.8
h_2	70	0	0
a_2	0.05	0	0
b	0.05	0.021	0

ここで図-3 と図-2-a)からおおよその上部タンクは実験のテンシオメータ A, 中部タンクはテンシオメータ B, 下部タンクはテンシオメータ C 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 A の体積含水率 θ , 中部タンクと B, 下部タンクと C 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。このように斜面内の水の移動が支配的な浸透初期では結果に違いがみられるが、斜面内の土が飽和状態に近づく 100min 以降では両者はほぼ同様の挙動を示している。ただし、下部タンクに関しては、体積含水率の初期値が他の 2 つのテンシオメータより高い値を示していたため、高い数値のまま推移し挙動のずれが生じたと考えられる。

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。そして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, 図-7 に単位体積重量の経時変化を示す。また図-8 に斜面内要素の浸透水圧に対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を考えることで、(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。

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

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 : $9.81 \times 10^{-6} \text{ (N/mm}^3\text{)}$ 、 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-9 に示す剛塑性解析で得られた荷重係数 μ の変化を比較する。また、図-10 にタンクモデルの流出解析による下部タンクの浸透水圧を考慮せず算出した荷重係数 μ の変化を示す。なお、解析においては、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-9 より、荷重係数 μ が単調に減少して $\mu=0.902$ となって初めて 1 を下回る経過時間 220min は、図 2-b)の実験での法先の崩壊発生時間 225min と対応しており、このとき、図-8 より浸透水圧が法先に作用していることがわかる。また、図-9、図-10 から下部タンクの浸透水圧を考慮しない図-10 の荷重係数 μ の減少量は図-9 に比べて小さく 220min を経過しても 1 を下回らないことが分かる。このことから、斜面の法先からの流出による浸透水圧が斜面の安全率に大きく影響していると考えられる。

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面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、感謝を表する。

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)酒匂一成, 須田剛文, 里見知昭, 深川良一, 北村良介: 降雨によるまき土斜面の浸透・崩壊に関する室内土槽試験, シンポジウム論文集
- 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
0.102	2.13	0.199	0.517

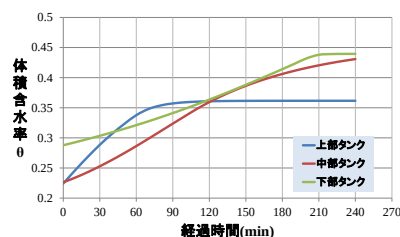


図-4 体積含水率の解析結果

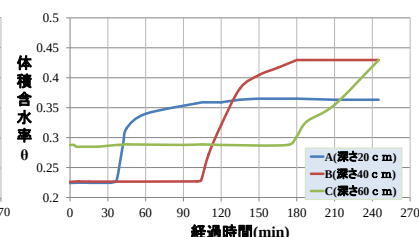


図-5 体積含水率の測定結果

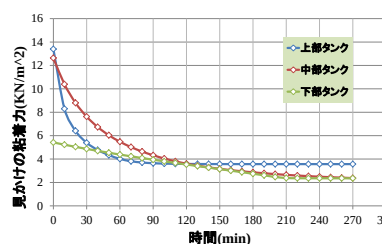


図-6 見かけの粘着力の経時変化

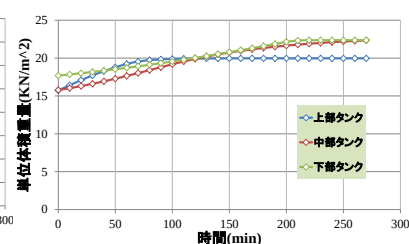


図-7 単位体積重量の経時

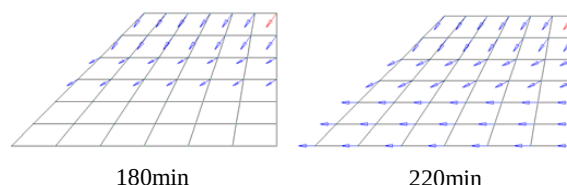


図-8 浸透水圧に相当する等価節点外力

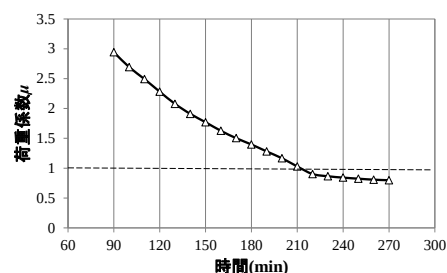


図-9 荷重係数 μ の変化

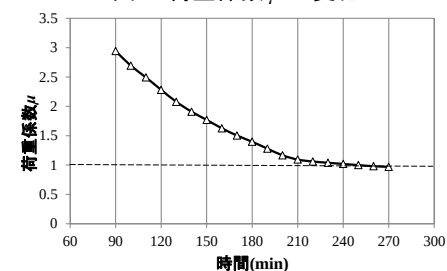


図-10 荷重係数 μ の変化

(下部タンクの浸透水圧を考慮しない)