

盛土斜面を対象としたタンクモデル法を用いた降雨時の斜面安定解析

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 国際会員 赤木 寛一

1.はじめに

近年、異常気象の影響で、短時間での集中豪雨により日本各地で土砂災害が発生している。これらの土砂災害の被害を最小限にするためには、斜面の地盤条件と降雨の影響を考慮した斜面安定解析手法を検証することが重要である。そこで著者らは、土壌中の水分量を示す指標である土壌雨量指数の算出に使われているタンクモデルを用いて解析を実施し、単位体積重量、見かけの粘着力、浸透水圧及び地盤条件を考慮した斜面安定解析を検討している。このうち本研究では、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し、検証した結果を報告する。

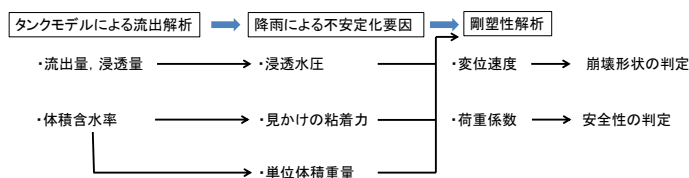


図-1 提案する手法

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.土の体積含水率に着目したタンクモデルによる流出解析

3.1 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、降雨装置により降雨を再現し、浸透・崩壊状況を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使用する解析手法による結果を比較検討した。

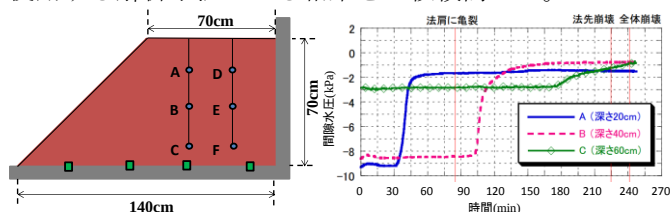


図-2-a) 盛土斜面

図-2-b) 間隙水圧の測定結果

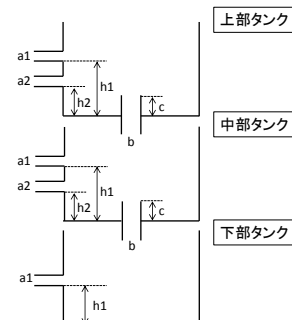
3.2 解析条件

対象とする実験の模型斜面の解析モデルは図-3-(a)に示すような盛土斜面 FEM メッシュであり、(b)のタンクモデルは三段直列モデルであり、(c)は両者を重ね合わせて表したものである。その際、上部3段のメッシュに対応する上部タ

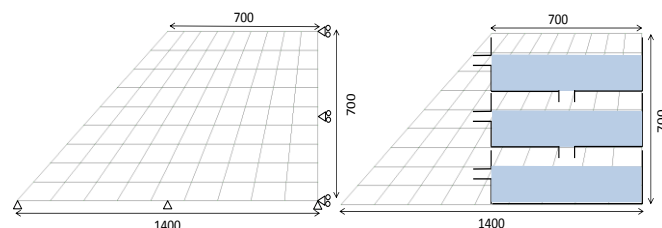
ンク、中央部3段のメッシュに対応する中部タンクに2つ、下部3段のメッシュに対応する下部タンクに1つの流出孔を設けた。また、上部タンク、中部タンクに設けられた浸透孔は、タンク内に水が貯留してもすぐには浸透しないような構造にし、中部、下部タンクへの水の浸透の遅れを再現できるようにした。表-1には、実験結果とのフィッティングにより求めたこの条件におけるタンクモデルパラメータを示す。降雨条件は、実験条件が時間雨量 50mm であるので、10 分間雨量に換算し 8.3(mm/10min)とした。また初期貯留水 S_0 に関しては、図-2-(b)の実験結果から得られる実験開始時の間隙水圧から貯留高を算出し、その値を初期貯留高とした。

表-1 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	37.25	37.78	51.76
h_1	52	79	66
a_1	0.19	0.03	0.21
h_2	39	50	
a_2	0.027	0.029	
b	0.043	0.031	
c	60	70	



(b)タンクモデル



(a)FEM メッシュ

(c)重ね合わせモデル

図-3 解析モデル

3.3 解析結果

図-4に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、下部タンクに相当する土の体積含水率 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ヨ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。

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

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 :サクシヨン(cm)、 α (1/cm)
 n, m ($m=(1-1/n)$):実験定数

表-2 パラメータ

α	n	θ_s	θ_r
0.07	1.82	0.338	0.11

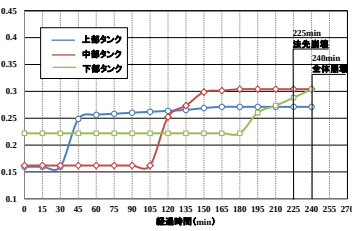
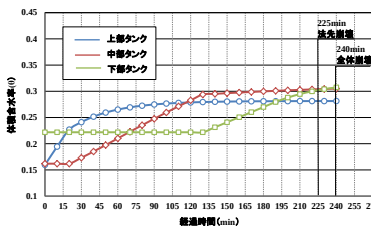


図-4 体積含水率の解析結果 図-5 体積含水率の測定結果

ここで、図-3 と図-2-a)から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,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、図-3-b)に示したタンクモデルの構造により、上部タンクからの浸透による中部、下部タンクの体積含水率の反応を遅らせることができ、降雨が盛土内を徐々に浸透していく様子を再現することができた。また、斜面内の土が飽和に状態に近づく 100min 以降でも両者はほぼ同様の挙動を示している。

4.剛塑性有限要素法による斜面安定解析

4.1 不安定化要因の算定

(a)浸透水圧の算定

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、浸透水圧を算出した。各タンクと盛土斜面の位置関係を図-6 に示す。また、斜面内要素に対する浸透水圧に起用する等価節点外力の分布図を図-7 に示す。このとき、各タンクの側面からの流出量を x 方向の流れとし、水平方向の水の流れを考えると、(2)式の連続式より水平方向に対する動水勾配を決定、その結果に基づき、(3)式より浸透水圧を算出した。同様に、浸透量を各タンクの底面全体から生じるものとし、鉛直方向(y 方向)の水の流れを考えると、浸透水圧を算出した。

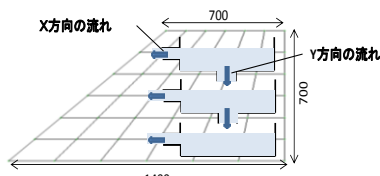


図-6 タンクモデルと盛土斜面

$$Q_x = A \times k \times i_x \quad (2) \quad f_x = \gamma_w \times i_x \quad (3)$$

ここに、 Q_x :各タンクの流出量、 A :断面積、 k :透水係数、 i_x :動水勾配、 γ_w : $9.81 \times 10^{-6} (\text{N}/\text{mm}^3)$ 、 f_x :浸透水圧 (N/mm^3)

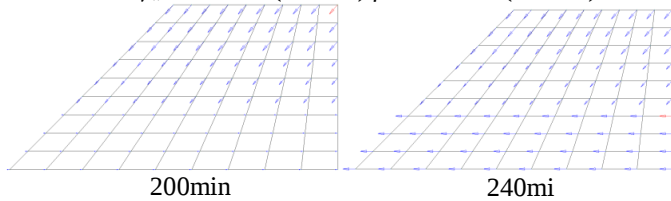


図-7 浸透水圧に相当する等価節点外力

(b)見かけの粘着力の算定

軽部らの式と Bishop の有効応力式から、式(4)を用いてサクシオン ψ 、体積含水率 θ (飽和度 S_r) から見かけの粘着力を算出した。

$$c = c' + \frac{S_r - S_{r0}}{100 - S_{r0}} \cdot \gamma_w \cdot \psi \cdot \tan \phi \quad (4)$$

ここに、 c :粘着力 (kN/m^2)、 c' :飽和時の粘着力 (kN/m^2)、 S_r :飽和度、 S_{r0} :最小飽和度、 ψ :サクシオン (m)、 ϕ :内部摩擦角 ($^\circ$)

(c)単位体積重量の算定

単位体積重量は式(5)を用いて体積含水率から算出した。

$$\gamma_t = \gamma_d + \theta \cdot \gamma_w \quad (5)$$

ここに、 γ_d :単位乾燥重量

4.2 解析条件

表-3 に解析で用いた地盤条件を示す。図-3-a)に示す解析モデルを使用し、要素数 81,節点数 100 とした。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。解析では、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-8,9 に算出した各タンクに相当する土の粘着力と単位体積重量の経時変化を示す。

表-3 地盤条件

水の単位体積重量 $\gamma_w (\text{kN}/\text{m}^3)$	9.81	一般値
土粒子の単位体積重量 $\gamma_s (\text{kN}/\text{m}^3)$	25.67	実験値
地盤の乾燥重量 $\gamma_d (\text{kN}/\text{m}^3)$	14.95	
間隙比 e	0.72	
内部摩擦角 $\phi (^\circ)$	18.9	
飽和透水係数 $k (\text{mm}/\text{s})$	7.02×10^{-2} (飽和度 75.3%)	推定値
飽和時の粘着力 $c (\text{kN}/\text{m}^2)$	0	

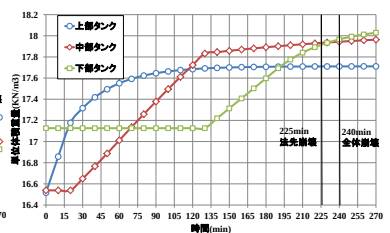
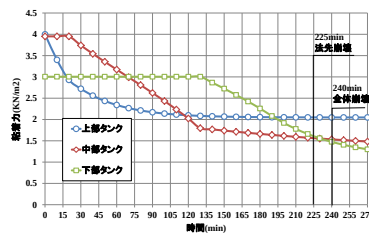


図-8 粘着力の経時変化 図-9 単位体積重量の経時変化

4.3 解析結果

(a)粘着力と単位体積重量の変化を考慮した場合

粘着力と単位体積重量の変化を考慮して剛塑性解析を実施した場合の荷重係数 μ の推移を図-10 に示す。図-10 から 240 分 ($\mu=0.941$) に荷重係数 μ が 1 を下回っており、実験の模型まさ土斜面の全体崩壊が発生した 240 分と一致していることがわかる。

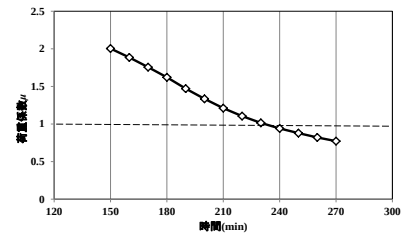


図-10 荷重係数 μ の変化

(b)粘着力、単位体積重量に加え、浸透水圧の変化を考慮した場合

粘着力、単位体積重量に加え、浸透水圧の変化を考慮した場合の荷重係数 μ の推移を図-11 に示す。浸透水圧を考慮した場合、荷重係数 μ が 1 を下回ったのは 210 分 ($\mu=0.945$) であり、これは、実験時の 225 分に発生した法先崩壊の時刻とほぼ一致している。図-10,11 の比較による荷重係数 μ の減少の違いから、浸透水圧の作用が法先崩壊に影響を与えていると考えられる。

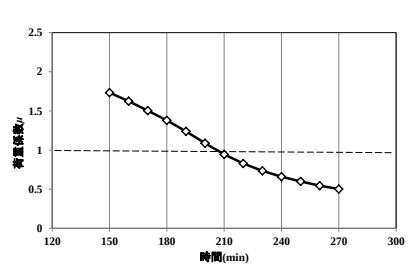


図-11 荷重係数 μ の変化

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安定解析により、別途行われた土槽実験における斜面崩壊時期とほぼ対応する結果が得られた。なお、本研究の実施に当たり、鹿児島大学北村先生、酒匂先生には貴重なデータを提供頂いたことをここに記し、謝意を表する。

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:降雨によるまさ土斜面の浸透・崩壊に関する室内土槽試験,第4回シンポジウム論文集,pp21-26
- 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