

# 雨水の浸透を考慮した豪雨時の剛塑性有限要素法による斜面安定解析

剛塑性有限要素法 タンクモデル まさ土

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

広島県広島市では、平成26年8月19日夜から20日明け方にかけて猛烈な雨となり、広島市安佐北区安佐南区を中心に数多くの土石流が発生した。発生した斜面崩壊の多くは表層崩壊であり、表層がまさ土で構成された急勾配な斜面であるという地盤条件に加え、3時間雨量200mmを超える降雨が要因になったと考えられる。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討することが重要である。そこで著者らは、図1に示すようなタンクモデル法と剛塑性有限要素法を組み合わせた手法を提案している。

このうち本研究では、この手法の妥当性を既往の室内土槽試験と比較した結果および平成26年8月20日に発生した広島市安佐北区可部東6丁目の斜面崩壊箇所を対象に現地調査を実施し、この解析手法の適用した結果を報告する。

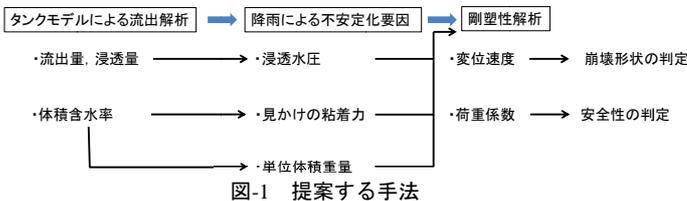


図-1 提案する手法

## 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 $\mu$ を求めるものである。著者らの手法では、降伏基準にはMohr-Coulomb則、塑性流れにはDrucker-Prager則を適用している<sup>1)</sup>。荷重係数 $\mu$ 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.雨水の浸透を考慮した剛塑性解析

### (a)見かけの粘着力の算定方法

軽部らの式と Bishop の有効応力の式から式(1)を用いて、サクシオン $\psi$ 、体積含水率 $\theta$ (飽和度 $S_r$ )から斜面内の土の見かけの粘着力を算定した。また、Van Genuchten 式と有効飽和度と体積含水率の関係式を式(2)に示す。

$$c = c' + \frac{S_r - S_{r0}}{100 - S_{r0}} \cdot \gamma_w \cdot \psi \cdot \tan \phi \quad (1)$$

ここに、 $c$ :粘着力(kN/m<sup>2</sup>)、 $c'$ :飽和時の粘着力(kN/m<sup>2</sup>)、 $S_r$ :飽和度、 $S_{r0}$ :最小飽和度、 $\psi$ :サクシオン(m)、 $\phi$ :内部摩擦角(°)

$$S_e = \left( \frac{1}{1 + (\alpha \times \phi)^n} \right)^m \quad S_e = (\theta - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r) \quad (2)$$

ここに、 $S_e$ :有効飽和度、 $\theta$ :体積含水率、 $\theta_r$ :残留体積含水率、 $\theta_s$ :飽和体積含水率、 $\phi$ :サクシオン(cm)、 $\alpha$ (1/cm)、 $n$ 、 $m=(1-1/n)$ :実験定数

式(1)と式(2)を組み合わせることにより、Van Genuchten 式のパラメータと体積含水率がわかれば見かけの粘着力を算定できる。

### (b)単位体積重量の算定方法

単位体積重量は式(3)を用いて体積含水率から算出した。

$$\gamma_i = \gamma_d + \theta \cdot \gamma_w \quad (3)$$

ここに、 $\gamma_d$ :単位乾燥重量

## 4.提案する手法の妥当性の検証

### 4.1.解析対象

酒匂らによる室内土槽試験<sup>2)</sup>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のテンシオメータ(A~F)により間隙水圧の経時変化を計測している。

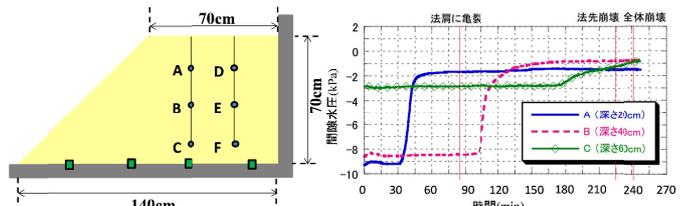


図-2-a) 盛土斜面

図-2-b) 間隙水圧の測定結果

## 4.2.三段直列タンクモデルを用いた体積含水率の再現解析

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、図-3-b)のタンクモデルは三段直列モデルであり、図-3-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第1タンク、中央部3段のメッシュに対応する第2タンクに2つ、下部3段のメッシュに対応する第3タンクに1つ流出孔を設けた。また、1,2段タンクは一定の高さまで貯留されないと下部タンクへの浸透が開始されない構造とすることで、深さ方向の水の浸透の遅れを再現した。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のパラメータを示す。降雨条件は、実験から(8.3mm/10min)とした。

表-1 タンクモデルパラメータ

係数	1段タンク	2段タンク	3段タンク
$S_0$	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	

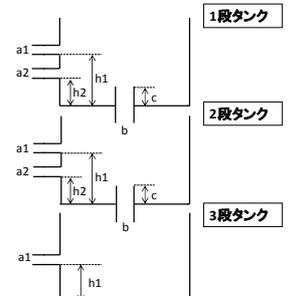


図-3-b) タンクモデル

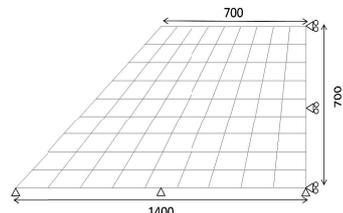


図-3-a) FEMメッシュ

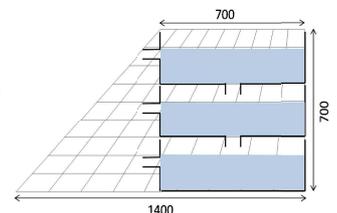


図-3-c) 重ね合わせモデル

図-4にタンクモデル法により算出された1段タンク2段タンク、3段タンクの体積含水率 $\theta$ の経時変化を示す。ここで体積含水率 $\theta$ は各タンクの貯留高を各タンクの高さに相当する(700/3mm)で除すことで算出した。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 $\theta$ の経時変化とした結果を示す。ここで、図-3と図-2-a)からおおよそその1段タンクは実験のテンシオメータA、2段タンクはテンシオメータB、3段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1段タンクとA、2段タンクとB、3段タンクとCの体積含水率 $\theta$ 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-4.5の比較から実験の盛土内の体積含水率の経時変化を再現できたといえる。

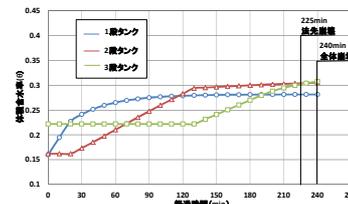


図-4 体積含水率の解析結果

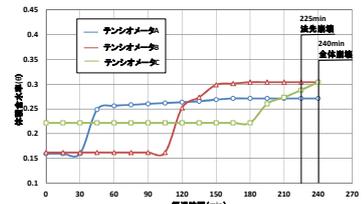


図-5 体積含水率の測定結果

4.3. 模型まさ土斜面を対象とした剛塑性有限要素法による斜面安定解析

表-2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。タンクモデル法による体積含水率 $\theta$ から得られた斜面内要素の見かけの粘着力,単位体積重量を剛塑性解析に入力した。図-6に荷重係数 $\mu$ の推移を示す。図-6から240分( $\mu=0.941$ )に荷重係数 $\mu$ 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。

表-2 地盤条件

水の単体積重量 $\gamma_w$ (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> )	25.67	実験値
地盤の乾燥重量 $\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	14.95	
間隙比 $e$	0.72	
内部摩擦角 $\phi$ (°)	18.9	推定値
飽和透水係数 $k$ (mm/s)	$7.02 \times 10^{-4}$ (飽和度75.3%)	
飽和時の粘着力 $c$ (kN/m <sup>2</sup> )	0	

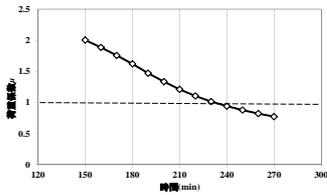


図-6 荷重係数 $\mu$ の変化

5. 平成26年8月20日広島市可部東地区土砂災害の事例解析

5.1 現地調査ならびに物性試験結果

本研究では,広島市安佐北区可部東6丁目に存在する斜面を検討対象とし,現地調査を平成27年9月21~22日の2日間実施した。実施した調査項目は,①軽量動的コーン貫入試験,②簡易測量,③試料のサンプリングである。図

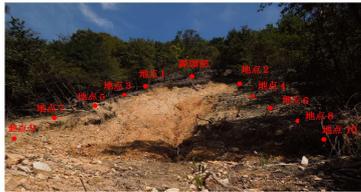


図-7 崩壊発生斜面の位置と様子

-7の写真には,現地で撮影した崩壊発生箇所の様子と調査を実施した地点を示している。現地調査により,源頭部の存在を確認し,崩壊長約30m,崩壊幅7~13m,崩壊深さ0.5~1.1mであることが分かった。①軽量動的コーン貫入試験により表層深さを推定した。

土田ら<sup>3)</sup>の研究によれば,軽量動的コーン貫入試験により得られる貫入抵抗値が10MPaを超えたところを基盤層とし,基盤層より上部を表層土と推定できることが報告されており,本研究でも同様の判断基準を用いた。②簡易測量を現地で実施し,各地点の水平距離および鉛直距離と軽量動的コーン貫入試験による表層推定値の関係から崩壊斜面の断面図を作成した(図-8)。また,崩壊斜面の勾配は30~34°の範囲にあることがわかった。

表-3 現地採取試料の物性値

$\omega$ (%)	$\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	$e$	$\theta$
16.6	2.56	1.34	0.91	0.24

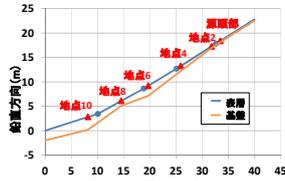


図-8 対象斜面の断面図

5.2 三段直列タンクモデルを用いた体積含水率の推定

三段直列モデル(図-9)は,気象庁の土壤雨量指数を計算するために使用されている。本研究では,対象斜面の存在する流域に着目したタンクモデルによる流出解析を行うことで解析流量を算定し,その値を実測流量と比較することでタンクモデルのパラメータを決定した。表-4に平成11年6.29災害の降雨履歴ならびに実測流量を用いて試行錯誤により得た3段直列タンクモデルのパラメータを示す。対象斜面の流域は,根谷川流域(86.6km<sup>2</sup>)とし,根谷川の流量は新川橋観測所で計測された値を用い,雨量には大林雨量計で計測された値を用いた。次に,決定されたパラメータにより平成26年災害時の流出解析を行った。図-10に平成26年8月19日~20日の各タンクにおける貯留高と降雨の関係を示す。その際,降雨は三入観測所で計測されたものを用いた。

表-4 タンクモデルパラメータ

	1段タンク	2段タンク	3段タンク
流出孔の高さ(mm)	$h_1=20$ $h_2=66$	$h_3=15$	$h_4=15$
流出係数(1/h)	$\alpha_1=0.07$ $\alpha_2=0.1$	$\alpha_3=0.08$	$\alpha_4=0.03$
浸透係数(1/h)	$\beta_1=1.2$	$\beta_2=0.045$	$\beta_3=0.0005$

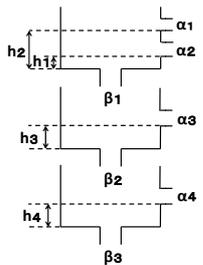


図-9 三段直列タンク

道土ら<sup>4)</sup>の研究によれば,タンクモデル法における1,2段目のタンクの貯留高の合計は,土石流の発生タイミングとよい相関性が

見られることが報告されている。このことから,1,2段タンクの貯留高は表層の水分量を表現していると考えられるため,図-11に示すようにタンクモデルと斜面を重ね合わせたモデルを作成することとした。したがって,表層に1,2段タンクが対応すると考えることができ,貯留高を用いて表層の体積含水率は式(4)のように表すことができる。図-12に,式(4)によって算定した対象斜面表層の体積含水率に応じた見かけの粘着力と単位体積重量の経時変化を示す。

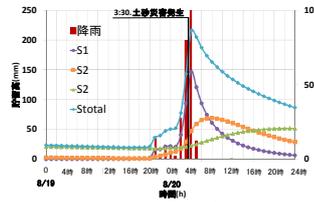


図-10 降雨と貯留高の関係

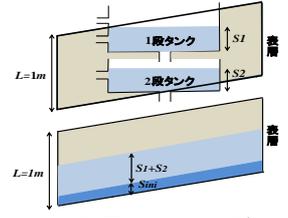


図-11 表層とタンクモデルの対応関係

$$\theta = \frac{S_1 + S_2}{L} + \theta_{ini} = \frac{S_1 + S_2 + S_{ini}}{L} \quad (4)$$

ここに, $S_1$ :1段タンクの貯留高, $S_2$ :2段タンクの貯留高, $\theta_{ini}$ :初期体積含水率(実験結果), $S_{ini}$ :初期体積含水率に対応する貯留高, $L$ :表層

5.3 剛塑性有限要素法による斜面崩壊の再現

図-13に示すように現地調査結果に基づき,崩壊した範囲の表層部分を1mとし簡易に対象斜面をモデル化した。要素数200,節点数255,変位境界条件は底面を水平固定,右側面を鉛直水平固定とし解析を実施した。

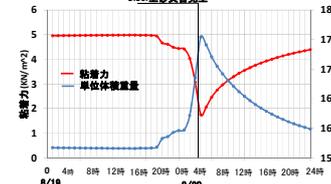


図-12 見かけの粘着力と単位体積重量

また,降雨の影響は,図-12に示す見かけの粘着力,単位体積重量を剛塑性解析に入力することで考慮した。また地盤条件は $\gamma_d=13.15$ (KN/m<sup>3</sup>),内部摩擦角(°)=35.2を用いた。図-14に,可部東地区の対象斜面の荷重係数 $\mu$ の推移を示す。図-14より,荷重係数 $\mu$ が降雨の増加によって減少し,荷重係数 $\mu$ が0.21となり1を下回る時刻(20日4時)は,実際に土砂災害が発生した時刻(20日3時30分)に対応していることがわかる。

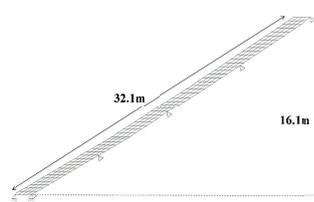


図-13 解析モデル

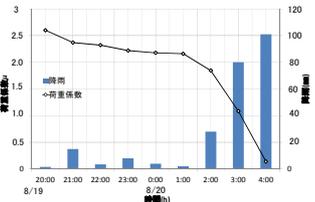


図-14 荷重係数の経時変化

6. おわりに

模型まさ土斜面を対象とした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,別途行われた土槽試験における崩壊発生タイミングとほぼ対応する結果が得られたことから,本手法の妥当性を確認した。また本手法を用いて,平成24年8月20日に広島市安佐北区可部東6丁目で発生した斜面崩壊を再現できることを確認した。なお本研究の実施にあたり,広島大学土田先生には貴重な試験装置をお貸し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回土砂災害に関するシンポジウム論文集, pp21-26, 2008
- 3) 川端昇一,土田孝,加納誠二,由利厚樹,花岡尚,中川翔太:地盤調査と斜面安定解析に基づく土砂災害危険渓流の豪雨時危険評価,地盤工学ジャーナル, vol8, pp1119-131, 2013
- 4) 道上正規,小島英司:集中豪雨によるかけ崩れの発生予測に関する研究,鳥取大学工学部研究報告,第12巻,第1号, pp167-178, 1981