

三連直列タンクモデルと剛塑性有限要素法を組み合わせた 現地調査に基づいた斜面安定解析

土砂災害 斜面安定解析 タンクモデル

早稲田大学 学生会員 ◦竹内 佳成
早稲田大学 学生会員 岡崎 啓一郎
早稲田大学 国際会員 赤木 寛一
東京地下鉄株式会社 正会員 小西 真治

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。

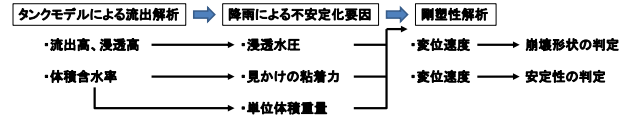


図-1 崩壊発生斜面の位置と様子

このうち本論文では、平成26年8月20日未明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、この解析手法を適用した結果を報告する。

2. 現地調査ならびに物性値の結果

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-2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¹⁾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-3)。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-1に③試料のサンプリングにより採取した試料に対して実施した物性試験結果を示す。

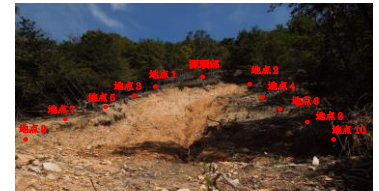


図-2 崩壊発生斜面の位置と様子

表-1 現地採取試料の物性値

$\omega(\%)$	$\rho_s(\text{g/cm}^3)$	$\rho_d(\text{g/cm}^3)$	e	θ
16.6	2.56	1.34	0.91	0.24

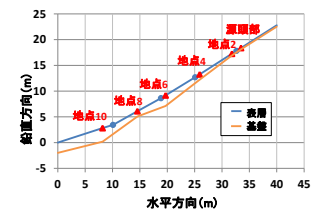


図-3 対象斜面の断面図

3. 三連直列タンクモデル及びパラメータ設定

本研究では、図-4に示すとおり、直列三段タンクモデルを斜面の上部、中部、下部に対応させ、雨水の鉛直・側方浸透による斜面高低に応じた含水状態の違いを考慮できるようにした3連直列タンクモデルを用いた。斜面上部の直列三段タンクモデル(上部タンク)が基点となり、中部タンク、下部タンクと順に連結している。上部タンクの流出高は、中部タンクに浸透水として加算され流入する。中部タンクの流出高も同様に下部タンクへ流入する。

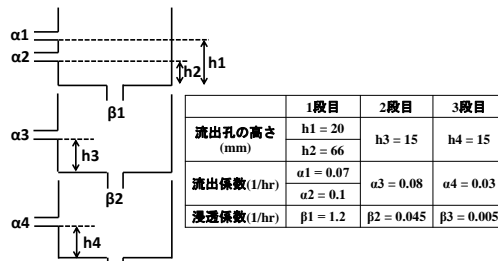


図-5 タンクモデルパラメータ

本研究では、対象斜面の所属する流域に着目したタンクモデルによる流出解析を行い、解析流量と実測流量を比較することでタンクモデルのパラメータを決定した。図-5に、

広島市で発生した平成11年6.29災害を対象として試行錯誤により得た三連直列タンクモデルのパラメータを示す。解析対象の流域は、根谷川流域(86.6km²)とし、根谷川の流量は新川橋観測所、雨量は大林雨量計で計測された値を用いた。

4. 三連直列タンクモデルを用いた体積含水率の推定

決定したパラメータにより平成26年広島土砂災害の流出解析を行った。図-6に平成26年8月19日~20日のタンクモデルの貯留高と降雨の関係を示す。その際、降雨は三入雨量計で計測されたものを用いた。また、貯留高は上部、中部、下部タンクそれぞれの1, 2段タンクの合計を示す。

道上ら²⁾の研究によれば、タンクモデル法における1, 2段タンクの貯留高の合

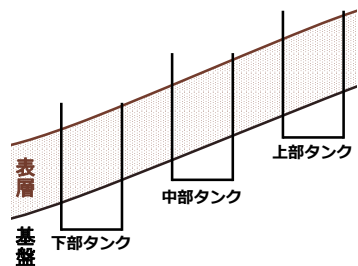


図-4 三連直列タンクモデルと斜面の位置関係

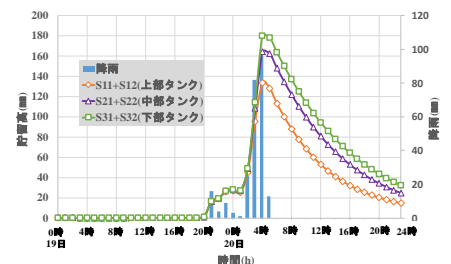


図-6 降雨と貯留高の関係

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-7に示すようなタンクモデルと斜面を重ね合わせたモデルを作製した。したがって、斜面表層に1, 2 段タンクが対応すると考え、貯留高を用いて表層の体積含水率は式(1)のように表すことができる。

$$\theta = \frac{S_1 + S_2}{L} + \theta_{mi} = \frac{S_1 + S_2 + S_{mi}}{L} \quad (1)$$

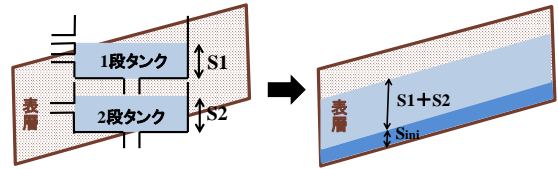


図-7 斜面とタンクモデルの対応関係

5. 雨水の浸透を考慮した剛塑性有限要素法による斜面安定解析

(a) 見かけの粘着力の算定方法

軽部ら³⁾の式と Bishop の有効応力式から、式(2)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定した。

$$c = c' + \frac{S_r - S_{r0}}{100 - S_{r0}} \cdot \gamma_w \cdot \psi \cdot \tan \phi \quad (2)$$

ここに c :粘着力(kN/m²), c' :飽和時の粘着力(kN/m²), S_r :飽和度, S_{r0} :最小の飽和度, ψ :サクシオン(m), ϕ :内部摩擦角(°) また、サクシオン ψ を算出するために使用した van genuchten 式を式(3)に、パラメータを表-2 に示す。

$$S_e = \left(\frac{1}{1 + (a \times \phi)^n} \right)^m \quad S_e = (\theta - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r) \quad (3)$$

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, ψ :サクシオン (cm), a (1/cm) n , m (=1-1/n):実験定数

(b) 単位体積重量の算定方法

単位体積重量は式(4)を用いて体積含水率から算出した。

$$\gamma_t = \gamma_d + \theta \cdot \gamma_w \dots (4)$$

ここに γ_d :単位乾燥重量

(c) 解析条件

図-8 に示すように現地調査の結果に基づき、崩壊した範囲の表層厚さを 1m とし簡易にモデル化した。要素数 200, 節点数 255, 変位境界条件は斜面先底面を水平固定, 右側面を鉛直水平固定とし解析を実施した。また、図-9 は解析モデルと三連直列タンクモデルを重ね合わせて表したものである。上部タンクの1, 2 段タンクは、解析モデルの上部と対応しており、中部タンク, 下部タンクも同様に解析モデルの中部, 下部とそれぞれ対応している。降雨の影響は体積含水率の経時変化から得られた斜面不安定要素の見かけの粘着力, 単位体積重量を剛塑性解析へ入力することで考慮した。図-10 に解析に用いた見かけの粘着力と単位体積重量の経時変化を示す。また解析に用いた地盤条件を表-3 に示す。

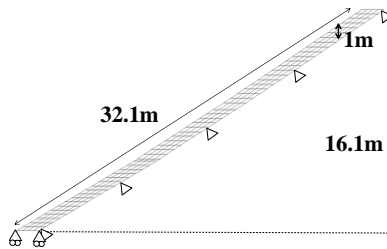


図-8 解析モデル

表-2 Van Genuchten 式のパラメータ

α	n	θ_s	θ_r
0.0193	1.78	0.473	0.154

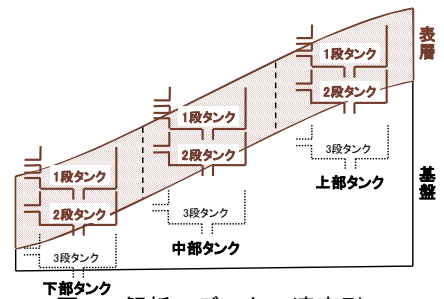


図-9 解析モデルと三連直列タンクモデルの重ね合わせ

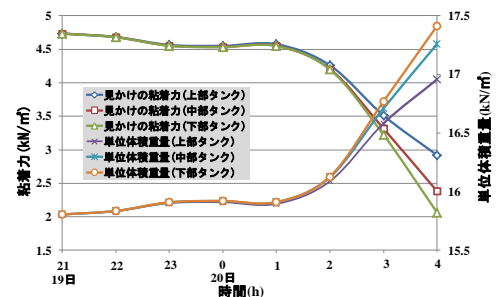


図-10 見かけの粘着力と単位体積重量の経時変化

(d) 解析結果

図-11 に、可部東 6 丁目地区の対象斜面で崩壊が発生した時刻と、剛塑性有限要素法で得られた荷重係数 μ の推移を示す。この剛塑性解析によって得られる荷重係数 μ は斜面安定解析における安全率に相当する。したがって解析結果においては、荷重係数が 1 を下回るときに崩壊が発生すると判断できる。図-11 より、荷重係数 μ が 0.37 となって 1 を下回る時刻(20 日 4 時)は、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分かる。

6. おわりに

3 連直列タンクモデル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より、平成 26 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することができた。また、図-10 の各タンクにおける見かけの粘着力と単位体積重量の経時変化のグラフより、3 連直列タンクモデルを用いることで斜面内位置に応じた含水状態の違いを考慮できたと考えられる。なお、現地調査にあたって、広島大学土田先生には貴重な実験装置をお貸し頂いたことをここに記し、感謝を表す。

参考文献

- 1) 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度評価, 地盤工学ジャーナル, Vol.8, No.1, pp.119-131, 2013
- 2) 道上正規・小島英司: 集中豪雨による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, pp.167-178, 1981
- 3) 軽部大蔵, 加藤正司, 浜田耕一, 本田道誠: 不飽和土の間隙水の状態と土塊の力学的挙動の関係について, 土木学会論文集, No.554, pp.83-92, 1996

表-3 地盤条件

水の単位体積重量 γ_w (kN/m ³)	9.81	一般値
粒子の単位体積重量 γ_s (kN/m ³)	25.09	実験値
地盤の乾燥重量 γ_d (kN/m ²)	13.15	
間隙比 e	0.91	
間隙率 n (%)	47.6	推定値
初期体積含水率 θ	0.24	
飽和時の粘着力 c (kN/m ²)	0	
内部摩擦角 ϕ (°)	35.2	

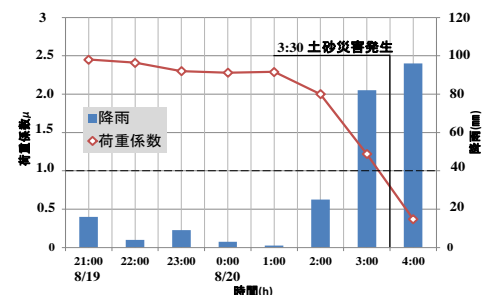


図-11 荷重係数 μ の経時変化