

# 現地調査とタンクモデル法に基づいた剛塑性有限要素法による豪雨時の斜面安定解析

早稲田大学 学生会員 ○安藤 悠 早稲田大学 学生会員 竹内 佳成  
 東京地下鉄株式会社 正会員 小西 真治 早稲田大学 正会員 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 時間雨量が 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、斜面の地盤条件と豪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。

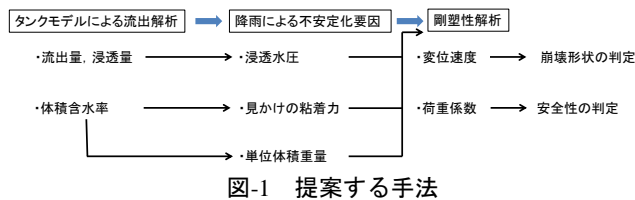


図-1 提案する手法

## 2.現地調査ならびに物性試験の結果

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、現地調査を人員 3 名で平成 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 30m、崩壊幅 7~13m、崩壊深さ 0.5~1.1m であることがわかった。図-3 に①軽量動的コーン貫入試験の結果、ならびにこの試験結果に基づく表層深さの推定結果を示す。土田ら<sup>(1)</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 をこ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で表層深さを推定した。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図-3 の表層推定値から崩壊斜面の断面図を作成した。(図-4) 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。



図-2 崩壊発生斜面の位置と様子

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。ハンドオーガーを用いて地表 1m 下の試料を採取し、攪乱試料とした。図-4 に示す断面図と表-1 に示す試験によって得られた物性値、体積含水率  $\theta$  を用いて解析を実施する。

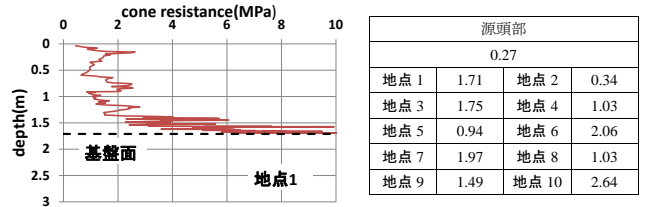


図-3 軽量動的コーン貫入試験結果と表層推定値(m)

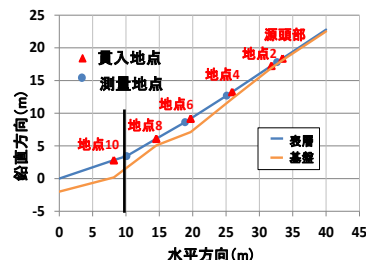


図-4 対象斜面の断面図

表-1 現地採取試料の物性試験結果

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

## 3.三段直列タンクモデルを用いた体積含水率の推定

三段直列タンクモデルは、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。本研究では図-5 に示すように、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、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。図-6 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。

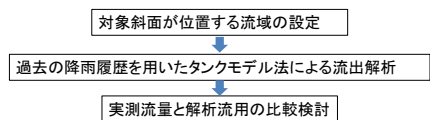


図-5 流出解析の流れ

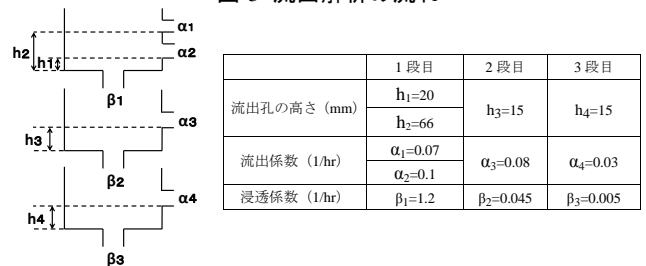


図-6 タンクモデルと決定されたパラメータ

次に、決定されたパラメータを用いて平成 26 年災害時の流出解析を行った。図-7 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。

キーワード：土砂災害、斜面安定解析、タンクモデル

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

道上<sup>(2)</sup>らの研究によれば、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、貯留高は表層の水分量を表現しているものと考えられるため、図-8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(1)のように表すことができる。図-9に式(1)によって算定した対象斜面の表層の体積含水率と降雨の関係を示している。

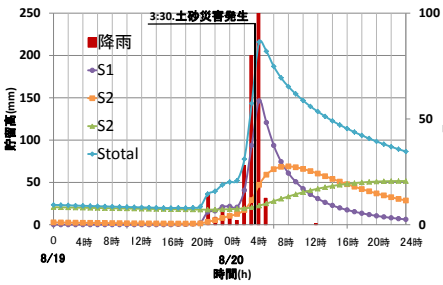


図-7 降雨と貯留高の関係

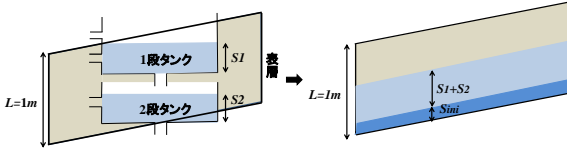


図-8 斜面とタンクモデルの対応関係

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

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

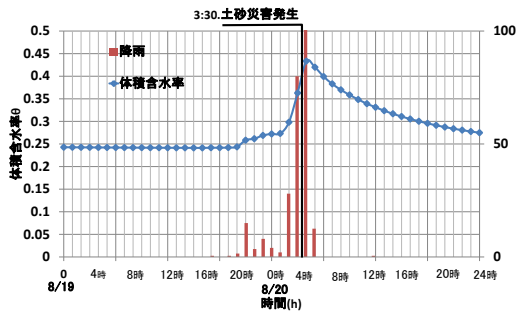


図-9 降雨と体積含水率の関係

4.降雨の影響を考慮した剛塑性有限要素法による斜面安定解析

図-1に示した流れのうち、見かけの粘着力と単位体積重量の算定方法について示す。

(a)見かけの粘着力の算定方法

軽部ら<sup>(3)</sup>の式と Bishop の有効応力式から、式(2)を用いてサクシオン  $\psi$ 、体積含水率  $\theta$ (飽和度  $S_r$ )から見かけの粘着力を算定した。

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

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、 $S_{r0}$ :最小の飽和度、 $\psi$ :サクシオン(m)、 $\phi$ :内部摩擦角(°)

また、サクシオン  $\psi$  を算出するために使用した van genuchten 式とパラメータを以下に示す。

$$Se = \left( \frac{1}{1 + (\alpha \cdot \psi)^n} \right)^m \quad Se = (\theta - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r) \dots\dots(3)$$

ここに、 $Se$ :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、 $\psi$ :サクシオン(cm)、 $\alpha$ (1/cm)<sup>n</sup>、 $m$ (=1-1/n):実験定数

表-2 Van Genuchten 式のパラメータ

$\alpha$	$n$	$\theta_s$	$\theta_r$
0.0193	1.78	0.473	0.154

(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。

$$\gamma_t = \gamma_d + \theta \cdot \gamma_w \dots\dots(4) \quad \text{ここに } \gamma_d: \text{単位乾燥重量}$$

(c)解析条件

図-10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部分を1mとし対象斜面を簡易にモデル化した。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。また、降雨の影響は図-9に示す体積含水率の経時変化から得られた斜面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の単位体積重量の経時変化を示す。解析に用いた地盤条件を表-3に示す。

水の単位体積重量 $\gamma_w$ (KN/m <sup>3</sup> )	9.81	一般値
粒子の単位体積重量 $\gamma_s$ (KN/m <sup>3</sup> )	25.09	実験値
地盤の乾燥重量 $\gamma_d$ (KN/m <sup>3</sup> )	13.15	
間隙比 $e$	0.91	実験値
間隙率 $n$ (%)	47.6	
初期体積含水率 $\theta$	0.24	推定値
飽和時の粘着力 $c$ (KN/m <sup>2</sup> )	0	
内部摩擦角 $\phi$ (°)	35.2	

表-3 地盤条件

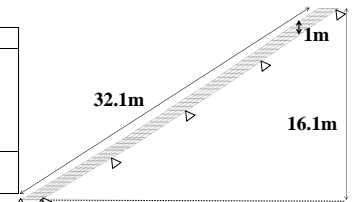


図-10 解析モデル

(d) 解析結果

図-11に、可部東6丁目地区の対象斜面にて崩壊が発生した時刻と、解析で得られた荷重係数  $\mu$  の推移を示す。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。剛塑性解析によって得られる荷重係数  $\mu$  は斜面の安定解析における安全率に相当する。したがって解析結果においては、荷重係数  $\mu$  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  $\mu$  が降雨の増加にしたがって減少し、 $\mu$  が0.21となって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分かる。

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、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。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実験装置をお貸し頂いたことをここに記し、感謝を表する。

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,Vol8,No1,pp119-131,2013
- 2)道上正規・小島英司:集中豪雨によるが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, 本田道識: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

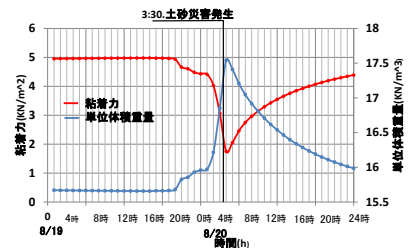


図-10 見かけの粘着力と単位体積重量の経時変化

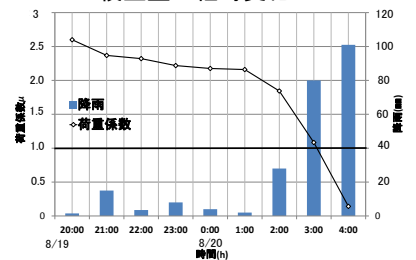


図-11 荷重係数の経時変化