

深層崩壊に起因する土石流のハイドログラフ作成方法と課題

国土技術政策総合研究所 ○坂田 剛（現 株式会社パスコ）・泉山寛明・山越隆雄

1. 背景

深層崩壊に起因する土石流は、頻度は少ないものの発生した場合には規模が大きくなり、被害想定の実施は砂防計画に重要である。土木研究所資料第4240号¹⁾では、深層崩壊に起因する土石流の数値計算手法がまとめられており、数値計算に用いるハイドログラフの設定例(以下土研方式と示す)も示されている。土研方式は、「ピーク流量は最大で、継続時間は最短な現象に近い」²⁾現象を想定しており、条件によっては実現象に対して過大な流量・流速が算出されてしまう場合がある。

土研方式では、数値計算に崩壊地脚部でのハイドログラフを用いることを想定しており、崩壊地脚部での流速と水深が高橋の石礫型土石流の抵抗則³⁾に従うと仮定して、継続時間を導いている⁴⁾。想定する流動深と粒径によっては大きな相対水深となるため、過大な流速・流量が算出されることが予想される。

そこで、本研究では相対水深に着目し、土研方式が適用できる条件を明らかにし、土研方式が適用できない条件において、別の手法によるハイドログラフ作成方法の検討を行うことを目的とする。

2. 研究方法

2. 1 土研方式の適用条件の検討

既往研究より抽出した過去の深層崩壊5事例のデータ(表1)を対象に高橋の石礫型土石流の構成則を用いて流速係数 U/u_* を算出するとともに、高橋の石礫型土石流の構成則の適用範囲を確認するため相対水深 h/d と U/u_* の関係図($U/u_* \sim h/d$ 図)を作成した。間隙流体密度は5事例については、細粒土砂と粗粒土砂の境界粒径(D_c)を0.1mmと仮定して、土研方式の設定方法と同じ(1)式によって設定した。 $U/u_* \sim h/d$ 図作成には1.0および1.2[g/cm³]の2パターンの間隙流体密度を仮定した。また斜面勾配 θ は5事例については崩壊地脚部の勾配を使用し、 $U/u_* \sim h/d$ 図作成には高橋の土石流発生条件式⁵⁾で $h/d=1.4$ となる勾配(12.2°, 9.8°), 平衡土砂濃度式⁵⁾で土石流の土砂濃度が0.9C_{*}となる勾配(18.98°, 16.17°)の範囲で算出した。高橋の土石流発生条件式⁵⁾で $h/d=1.4$ としたのは、これより相対水深が大きい場合には、土石流として流下するためには勾配を上げる必要があり $h/d=1.4$ の条件で求められる勾配が土石流発生区間の限界勾配の下限となるためである。土石流の土砂濃度が0.9C_{*}以上となると土石流として流動することができなくなるため、平衡土砂濃度式⁵⁾で0.9C_{*}となる勾配が土石流発生区間の限界勾配の上限である。なお間隙流体密度を2パターン設定しているためそれぞれの算出式で2つの限界勾配が算出されている。土石流の濃度は平衡土砂濃度式⁵⁾より設定した。設定した土石流の土砂濃度を高橋の石礫型土石流の抵抗則³⁾に代入し流速係数(U/u_*)を算出した。算出した流速係数が清水乱流の流速係数を超過する範囲を土研方式の適用範囲とした。清水乱流の流速係数は(2)式より求めた。

$$\rho_d = \frac{\lambda \rho_w + (1-\lambda) \sigma P(D_c)}{\lambda + (1-\lambda) P(D_c)} \quad (1)$$

項目	船石川	集川	片井野川	七瀬谷	別府田野川 右支溪	単位
土粒子の密度 σ	2,650	2,650	2,650	2,650	2,650	kg/m ³
間隙水の密度 ρ	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	kg/m ³
土塊の平均密度 ρ_m	1,578	2,089	2,089	2,089	2,089	kg/m ³
崩壊斜面長(土塊の長さ)L	165	120	751	314	412	m
固体動摩擦係数 μ_k	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56	
崩壊地の斜面勾配 θ_s	36.9	41.8	26.3	18.8	26.9	°
土塊の空隙率 λ	0.65	0.34	0.34	0.34	0.34	
崩壊土砂量V	18,500	21,350	402,210	183,000	430,640	m ³
代表粒径 d_{90}	2.57	0.93	3.10	0.24	0.03	m
代表土層厚(水深)h	3	4	13	29	17	m
相対水深 h/d_{90}	1	4	4	122	515	
土塊の断面積 A_t	561	423	9,576	9,150	7,177	m ²
崩壊地脚部の河道幅B	33	50	42	20	60	m
崩壊地脚部の勾配 θ	13.0	16.2	9.5	18.0	13.1	°
崩壊地の頂部と脚部の比高差	99	80	333	101	186	m

表1 既往深層崩壊事例の諸元

項目	船石川	集川	片井野川	七瀬谷	別府田野川 右支溪
n	0.045	0.038	0.046	0.030	0.022

表2 マニングの粗度係数の算出結果

$$\frac{U}{u_*} = 6.0 + 5.75 \log_{10} \frac{R}{k_s} \quad (2)$$

ここに ρ_d : 細粒土砂の取り込みを考慮した間隙流体密度, λ : 土石流中の清水の割合(空隙率), ρ_w : 清水の密度, σ : 礫の密度, $P(D_c)$: 全土石に占める粒径が D_c 以下の土石の割合, U : 流れの断面平均流速, u_* : 摩擦速度, R : 径深, k_s : 相当粗度である。(2)式において, R が水深, k_s が粒径に等しいとみなし, 流速係数を算出した。

2. 2 土研方式の適用条件外での検討

2. 2. 1 マニング型の抵抗則

相対水深が大きい領域での適用性を確認するため、崩壊地脚部の土石流の流速と水深がマニング式に従うと仮定し、既往研究より抽出した過去の深層崩壊5事例のデータ(表1)を対象に、マニング式により土石流の流速 U を算出した。

マニングの粗度係数 n は、既往研究⁶⁾の手法を用いて(3)式および(4)式により設定した(表2)。

$$\sqrt{\frac{8}{f}} = 8.3 \left(\frac{h}{d_{90}} \right)^{1/6} \quad (3), \quad n = \sqrt{\frac{f}{8g}} h^{1/6} \quad (4)$$

ここに h : 土石流の水深, d_{90} : 累積頻度90%の粒径, g : 重力加速度である。

上記の設定により算出した流速 U を用いて流速係数を求め、(2)式の清水乱流の流速係数と比較した。更に崩壊土砂が崩壊地頂部から崩壊地末端まで空気抵抗を考慮しないで自由落下した速度と上記の流速 U を比較することにより土研方式が適用できない場合におけるマニング式の適用可能性を検討した。

2. 2. 2 崩壊土塊に関する抵抗則

崩壊土塊の運動に関する既往研究⁷⁾では、崩壊土塊の推進力として重力による作用、抵抗力として固体摩擦および流体摩擦力を想定し、以下の抵抗則を提示している。

$$\frac{dU}{dt} = g \sin \theta_s - \mu_k \frac{(1-\lambda)(\sigma-\rho)}{\rho_m} g \cos \theta_s - \frac{\rho L}{\rho_m A_f} f_b U^2 \quad (5)$$

ここに U : 土塊の移動速度, θ_s : 崩壊地の斜面勾配, μ_k : 固体動摩擦係数, ρ : 間隙水の密度, ρ_m : 土塊の平均密度, L : 土塊の長さ(崩壊斜面長), A_f : 土塊の断面積, f_b : 土塊の流体抵抗係数である。

2.2.1.と同様に既往研究より抽出した過去の深層崩壊5事例のデータ(表1)を対象に、(5)式より崩壊土塊が移動を開始して、平衡状態になった時の移動速度(定常速度) U を算出した。求めた U から流速係数を算出し、(2)式の清水乱流の流速係数と比較し、土研方式が適用できない場合における(5)式の適用可能性を検討した。

3. 研究結果

3. 1 土研方式の適用条件の検討結果

図1に土研方式の適用条件の検討結果を示す。図1では、実線の直線が間隙流体密度を $1.0[\text{g}/\text{cm}^3]$ とした場合、破線が間隙流体密度を $1.2[\text{g}/\text{cm}^3]$ とした場合の高橋の石礫型土石流の抵抗則³⁾より算出した流速係数を示す。既往深層崩壊5事例を対象とした流速係数を赤いプロットで示している。図1に示した①～③の領域ごとに以下の特徴が明らかになった。

- ① : 相対水深が13より小さい場合は、土石流の発生区間で想定される土砂濃度では、清水乱流を超過しない。
- ② : 相対水深が13～170の範囲では、土砂濃度の値により清水乱流を超過する場合もある。
- ③ : 相対水深が170を超えると土砂濃度の値によらず、清水乱流を超過する。

3. 2 土研方式の代替手法の検討結果

図2に2つの流速算出式より求めた流速係数(U/u_*)の算出結果を示している。青色のプロットがマンニング式より算出した結果、橙色のプロットが(5)式で算出した結果、緑色のプロットが自由落下速度を u_* で除した流速係数を示している。図2より明らかになった特徴をまとめると、以下の2点である。

- ① : マニング式から算出した値は、相対水深が小さい2事例(船石川、集川)で清水乱流を超過する。
- ② : マニング式から算出した値は、相対水深が大きい2事例(七瀬谷、別府田野川右支溪)で清水乱流を超過しないが、自由落下速度を超過する。
- ③ : (5)式の流速係数は、相対水深が大きい2事例(七瀬谷、別府田野川右支溪)で清水乱流を超過する。
- ④ : 相対水深が小さい3事例(船石川、集川、片井野川)では、自由落下速度よりも清水乱流の方が小さい。

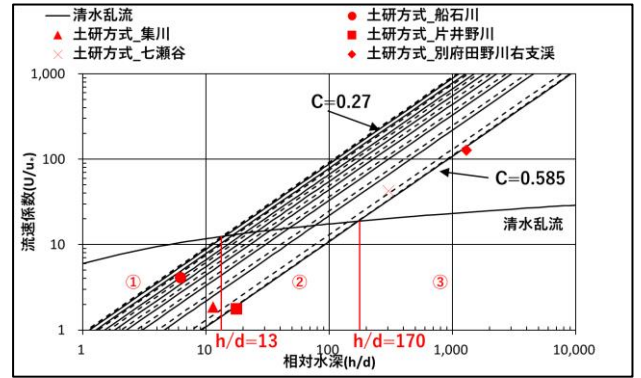


図1 土研方式の適用範囲の検討結果

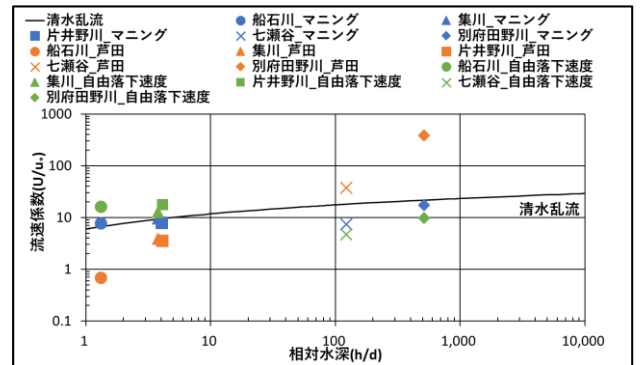


図2 算出した流速係数と清水乱流の比較

4. まとめ

相対水深が13より小さい場合は、土石流の土砂濃度の範囲では、土研方式を用いて問題ないことが示された。また相対水深が170より大きくなる場合は、土研方式を用いると流速が過大になるため、清水乱流を上限值とする必要がある。

既往の崩壊土塊に関する抵抗則とマンニング式による流速を比較検討した結果、どちらの算出式でも相対水深が大きい領域においては、自由落下速度を超過してしまっていたが、マンニング式では清水乱流を超過しなかった。相対水深が大きい領域では、自由落下速度と清水乱流を比較し、自由落下速度の方が清水乱流よりも大きい場合には、粒径に応じた粗度係数を設定すればマンニング式が適用できる可能性がある。本研究では既往の深層崩壊5事例の諸元を用いたが、石礫型土石流の適用限界となる相対水深30程度の領域のデータが不足しているため、今後はこの領域の崩壊事例のデータを用いて検討していく必要がある。

<参考文献>

- 1) 土木研究所：深層崩壊に起因する土石流の流下・氾濫計算手法(案)，土木研究所資料第4240号，2012
- 2) 国総研 砂防研究室：深層崩壊に起因する大規模土砂災害被害想定手法，国総研資料第983号，2017
- 3) 高橋 保：土石流の機構と対策，近未来社，p91
- 4) 西口幸希 内田太郎 石塚忠範 里深好文 中谷加奈：細粒土砂の挙動に着目した大規模土石流の流下過程に関する数値シミュレーション—深層崩壊に起因する土石流への適用—，砂防学会誌，Vol64, No3, P11-20, 2011
- 5) 高橋保：土石流の流動と発生に関する研究，京都大学防災研究所年報，第20号B-2, p408-409, 1977
- 6) Strickle, K. Beiträge zur Frage der Geschwindigkeitsformel und der Rauigkeitszahlen für Ströme, Kanäle und geschlossene Leitungen, Mitt. 16, Eidg. Amt für Wasserwirtschaft, Bern, Switzerland, 1923
- 7) 芦田和男 江頭進治 神矢弘 佐々木 浩：斜面における土塊の抵抗則と移動速度，京都大学防災研究所年報，第28号B-2, p297-307, 1985