論文

降雨と斜面の湧水の電気伝導度との関係に着目 した深層崩壊危険斜面抽出手法に関する研究 STUDY ON DEEP-SEATED LANDSLIDE EXTRACTION METHOD BASED ON RELATIONSHIP BETWEEN THE ELECTRIC CONDUCTIVITY OF SPRINGWATER OF DANGEROUS SLOPE AND RAINFALL

西岡 恒志¹・榎原 伴樹²・木下 篤彦³・田中 健貴⁴・海原 荘一⁵ Tsuneshi NISHIOKA, Tomoki ENOHARA, Atsuhiko KINOSHITA, Yasutaka TANAKA and Soichi KAIHARA

¹正会員 和歌山県土砂災害啓発センター(〒649-5302 和歌山県東牟婁郡那智勝浦町市野々3027-6)
 ²非会員 和歌山県土砂災害啓発センター(〒649-5302 和歌山県東牟婁郡那智勝浦町市野々3027-6)
 ³正会員 農博 国土交通省国土技術政策総合研究所(〒305-0804 茨城県つくば市旭1番地)

⁴非会員 農修 国土交通省近畿地方整備局大規模土砂災害対策技術センター(〒649-5302 和歌山県

東牟婁郡那智勝浦町市野々3027-6)

5 正会員 工博 株式会社エイト日本技術開発 (〒700-8617 岡山県岡山市津島京町 3-1-21)

This study was conducted in the dangerous slopes for deep-seated landslide existing in the Migi-Aizu River basin in the Tanabe City, Wakayama Prefecture. And focusing on the electric conductivity of the spring water after a rainfall and spring water flow rate and discharge rate of the tank model, examined the measurement criterion for the dangerous slopes for deep-seated landslide. From discharge rate of the tank model after rainfall as a result electric conductivity revealed about the observation period.

In result, the EC of spring water will change under the influence of rainfall, between the EC of spring water and the total tank volume have high relevance, the influence of rain continues longer than the EC of spring water in the tank outflow amount.

Key Words :electric conductivity, tank model, dangerous slopes for deep-seated landslide

1. はじめに

2011年9月の台風12号では、紀伊半島の奈良県十津 川流域や和歌山県日置川流域などで発生した深層崩壊お よびそれに伴う河道閉塞は、各地に甚大な被害をもたら した¹⁾.また、紀伊半島では1889年(明治22年)の奈 良県十津川流域や和歌山県右会津川流域、1953年(昭 和28年)の和歌山県有田川流域などにおいても、深層 崩壊およびそれに伴う河道閉塞の発生によって甚大な被 害が発生したことが報告されている²³⁾.深層崩壊やそ れに伴う河道閉塞はその発生頻度は少ないものの、ひと たび発生すれば甚大な被害が発生することはもとより、 住民避難の長期化など、社会的影響についても非常に大 きなものとなる.このため、深層崩壊が発生する恐れの ある斜面が分かれば、事前の準備や対応が可能となるた

め、その斜面を事前に抽出しておくことは重要である. 近年,深層崩壊発生跡地では多量の湧水が存在すること, これら湧水の電気伝導度(Electric Conductivity:以下, EC)が高いことが報告されており、深層崩壊地で EC が 高いことを利用した深層崩壊危険箇所を抽出する手法の 1 つとして、 湧水や渓流水の EC に着目した手法が提案 されている⁴⁾. 一方, EC は水中の溶存イオンの総量に 依存することから河川水などは降雨の影響を受けて変動 する. 湧水についても斜面に降った雨が浸透し, 流出し たものであるため、その EC も降雨の影響を受けている ことが考えられ、いつ、どのようなタイミングで湧水の EC を計測すれば精度よく観測が行うことができるのか を検討した事例は少ない. このため, 降雨の影響を考慮 して湧水の EC を精度よく観測する手法が明らかとなれ ば、深層崩壊危険斜面を抽出するための EC が精度よく 観測できる可能性がある.





図-2 深層崩壊危険斜面と観測箇所概要図



写真-1 図-2 中の湧水 EC 観測箇所の状況

湧水は地下水が地上に湧出してきたものと考えると, 降雨と地下水の流出量の関係を算出する手法としては, 菅原ら⁵によって提案されたタンクモデルがある.現在, この手法を利用して,気象庁では3段タンクモデルを用 いて地中の水分を算定し,土壌雨量指数と降雨量から崩 壊予測に役立てる取組が各地で実施されている.タンク モデルは降雨による土壌水分量の変動のほか,表面流出, 中間流出,地下水流出など各層の流出量のモデル化が可 能であり,地下から湧出してくる湧水の流量はタンクモ デルの各層から流出してくる流出量との相関は高いと考 えられる.

そこで、本研究では深層崩壊危険斜面から湧出する湧 水の流量がタンクモデルから流出する総流出量に等しい と考えて深層崩壊危険斜面流域におけるタンクモデルの 構築を行い、タンクからの流出量と降雨後の湧水の EC の関連性について明らかにすることで、降雨の影響を排 した EC の観測条件について検討した.

2. 調査地の概要



写真-2 図-1 中の湧水流量観測箇所,矢印は流向を示す.

(1) 深層崩壊危険斜面の選定

調査地として、まずはじめに深層崩壊危険斜面の選定 を行った.和歌山県内の深層崩壊の発生頻度が高い^のと されている範囲において、LP データを基に過去の深層 崩壊跡地や微地形判読から、深層崩壊の発生する恐れの ある斜面の抽出を行った.抽出した斜面の現地踏査を実 施し、湧水が湧出する斜面の中で、湧水の EC が周辺の 河川や渓流などより高い斜面について絞り込みを行った.

(2) 調査地の概要

調査地と深層崩壊危険斜面の概要を図-1,2,3 に示す. 右会津川流域の上秋津村(現和歌山県田辺市)では 1889年に発生した深層崩壊(長さ 720m,幅 540m)と, それに伴い発生した河道閉塞(高さ 15m,湛水量約 19 万 m³)および決壊により甚大な被害が生じている.地 質は第三紀の四万十帯で砂岩泥岩互層である.選定した 斜面は深層崩壊跡地に隣接する馬蹄形を呈した岩盤ク リープ斜面が2箇所あり,斜面上部には連続的な小崖地 形が側部の崩壊跡地と連続している.斜面の比高は約 150m,傾斜度は約45度,斜面下部は解放されているが 侵食は受けていない.斜面のひずみ率を算定すると 4.9%と 1.9%であり、2011 年に紀伊半島で多数発生した 深層崩壊斜面の崩壊前ひずみ率が 2~6%であったこと、 それら斜面の EC が高かったことと類似⁷していること などから、抽出したこの斜面は深層崩壊危険斜面である と判断できる. このうちの片方の斜面基部から多量の湧 水(毎秒約 1~20)が湧出しており、EC 値は 1 年を通 して 15~20mS/m であり、周辺の河川や渓流水の EC 値 (5~10mS/m)の約 2~3 倍と高い値を示していた. ま た湧水の水温は 1 年を通して約 16~18℃と一定の値を 示した. この湧水に着目して観測を実施した.

3. 湧水の水文・水質特性調査手法

(1) 湧水の EC 計測手法

湧水 EC の変化を継続的に計測するため、ロガー付き の EC 計(Onset 社: HOBO U24 電気伝導率ロガー) を湧出箇所に常時設置して観測し(写真-1),データ収 集した.また、比較のために湧水が流入する河川にも EC 計を設置して観測を行った.なお、淡水の EC 値は 1℃の水温の上昇に対して約 2%増加するため、一定温 度である 25℃の EC (以下, EC₂₅) で補正した. データの取得間隔は,雨量データの取得間隔と合わせた 10 分とした. 観測は 2015 年 11 月に開始し, 2017 年 7 月までの約1 年 9 ヶ月の間,実施した.

(2) 湧水の流量計測手法

湧水の流量の変化を継続的に計測した.現地の状況から堰式流量計の設置が困難であったため、流下断面と縦断の簡易測量を実施し、ロガー付き水位計(Onset 社: HOBO U20水位・水温ロガー)を設置して水位を計測し(写真-2)、マニング式より流量に換算した.データの取得間隔は EC と同様に 10 分とした.また、観測は2016 年 8 月から 2017 年 7 月までの1 年間、実施した.

(3) 湧水の地下滞留年数の計測手法

湧水の EC が高くなる要因の一つとして、イオンの溶 出はその経過時間に比例して溶出量が増加することが報 告⁸⁾されている.このため、湧水が地下を流下する過程 で地中の岩盤と接触する時間が長いとより多くのイオン を取り込んで EC が高くなることから湧水の地下滞留年 数が重要であると考え、地下水の年代推定に有用とされ



ている⁹, 湧水の六フッ化硫黄濃度(以下: SF₆)を分 析することで湧水が涵養された年代を推定し,地下滞留 年数の把握を行った.

4. 湧水の水文・水質観測結果

(1) 湧水の EC 観測結果

EC の観測結果を図-4 に示す. 湧水の EC は 1 年間を 通じて 15~20mS/m の値を示しているが,降雨時には減 少していることが確認できた. 観測箇所近傍で採水した 雨水の EC は殆ど 0mS/m であることや,降雨量によっ て EC の減少割合が異なることから,降雨の影響によっ て EC が低下したといえる. EC は降雨終了後に降雨前 の数値まで徐々に戻っていくが,降雨前の値まで戻るの に要する期間は,降雨量が多いほどその期間は長い傾向 あった.また,EC の減少率は,河川では降雨によって 降雨前の約 50~60%まで低下するのに対し,湧水は約 80%までの低下であったことから,湧水の EC は河川の EC より降雨の影響を受けにくいことが分かった.

(2) 湧水の水温観測結果

次に、水温の観測結果を図-5 に示す. 湧水の水温は

年間を通じて 16~18℃であるが,最低温度は 3 月下旬 から4月上旬に記録し,最高温度は 9 月下旬から 10 月 上旬に記録している.一方,河川の水温は概ね平均気温 の動きに追従しており,最低温度は平均気温が低くなる 1 月下旬から 2 月上旬に記録しており,同様に最高温度 も平均気温が高くなる 8 月に記録している.これらの観 測結果から,湧水の水温の変化は平均気温や河川の水温 の変化から約 2 ヶ月程度遅れていることが確認できる. このことから,湧水は気温の変化の影響を受けにくい深 部を流下していると考えられる.

(3) 湧水の流量観測結果

湧水の流量観測結果を図-6 に示す.流量は降雨直後 から増加しており,降雨に対する応答がよいといえる. これは,湧水観測箇所に表流水の流入がある ことや,伏流した漂流水がすぐに湧出してきたと考えら れる.なお,日雨量が約 50mm 以下だと湧水量は増加し ていなかったことから,降雨量が少ない場合は降雨はす べて地中に浸透して表流水が発生していない,もしくは 発生が少なかったことが考えられる.

(4) 湧水の水質特性の調査結果

SF6の濃度を2回計測した結果,地下滞留年数は平均



図-8 タンク総流出量と実測湧水量および EC との関係

降雨日 (2017年)	日雨量 (mm/day)	降雨前EC (mS/m) ①	降雨後EC (mS/m) ②	EC変化率 ③=②/①-1	降雨前タン ク総流出量 (m3/s) ④	降雨後タン ク総流出量 (m3/s) ⑤	タンク総流 出量変化率 ⑥=⑤/④-1	EC が降雨前 の値に回復 する日数	 タンク総流出 量が降雨前の 値に回復する 日数
6/21	153.5	18.2	16.1	-11.5%	122.2	151.1	23.6%	40* (98%)	40* (107%)
6/26	55.5	17.1	15.7	-8.2%	148.4	157.1	5.9%	23	27
6/29	21.5	16.0	15.9	-0.6%	155.4	156.1	0.5%	13	21
7/1,2	121	14.1	11.9	-15.6%	158.8	215.9	36.0%	9	13
7/5	31.5	13.0	12.8	-1.5%	187.0	191.4	2.4%	2	2
7/8	14.5	14.0	14.3	2.1%	166.8	166.1	-0.4%	_	_
7/15	50.0	16.5	16.7	1.2%	157.4	161.1	2.4%	_	3
*:()は記述した日数を要して回復した降雨前の値に対する割合									

表-1 タンク総流出量と湧水ECの降雨後の変化率及び降雨前の状況に回復する日数

8年で、2011年に奈良県五條市大塔町清水の赤谷地区で 発生した深層崩壊地の湧水の地下滞留年数12年より4

年ほど短かった¹⁰. このことから,降雨の深部地下 水への影響は少ないことが想定された.

5. 解析手法

(1) 湧水量算出のタンクモデル構築

観測された湧水量が表流水や土壌中に浸透した地下水 が流出したものの総流出量と考えると、湧水量はタンク モデルの各段からの流出量の総和として算出することが できる.そこで、湧水量とタンクモデルの総流出量が等 しくなるよう斜面の浸透・流出特性を表すタンクモデル のパラメータ同定を行い、そこで得られたタンクモデル を基にタンク流出量を算定し、湧水 EC との関連性を検 討した.タンクモデルは表面流出、表層浸透流出,深層 浸透流出が再現できる土壌雨量指数の算出にも用いられ ている直列3段タンク¹¹⁾のモデルとした.また、タンク モデルのパラメータの同定を効率的に行うために SCE-UA 法¹²¹³⁾を用いた.

(2) パラメータ同定に用いる降雨イベント

タンクモデルのパラメータ同定に用いる降雨イベント は、EC と湧水量が大きく変化する降水量が多いことが 望ましい.そこで、観測箇所において土砂災害警戒情報 が発令された大雨を含む期間に着目し、2017 年 6~7 月 の 2 ヶ月の期間について解析を実施した.この期間の最 大雨量は 6 月 21 日に日雨量 153.5mm,最大時間雨量 41.5mm(気象庁:栗栖川)を記録し、この前後で土砂 災害警戒情報が発令されている.なお、調査に適した観 測日を調べる目的から、雨量データは日雨量を使用し、 湧水量は毎 10 分データを日湧水量に換算して解析した.

(3) パラメータ解析結果と再現性の考察

SCE-UA 法で解析したパラメータを図-7に、解析した タンクモデルから算定したタンク流出量と実測湧水量及 び EC との関係のグラフを図-8 に示す. SCE-UA 法の Nash 係数は 0.807、タンクからの総流出量と観測湧水量 の相関係数は R=0.90 であり、両者は整合度が高いとい える.1 段、2 段タンクは降雨後にそれぞれ上昇し、1 段タンクは応答性が良く、2 段タンクは緩やかに反応し ている.3 段タンクは降雨に対する応答は見られな かった.1 段タンクについては降雨に対する応答が良い ことから、表面流水の流入が再現されていると判断でき、 2 段タンクについては、表層浸透流出が再現されている ものなので、降雨から一定の時間を経て応答しているも のと考えられる.3 段タンクの結果については、湧水の 地下滞留年数が約8年と長かったことかも降雨の応答が 見られなかったことは妥当と判断できる.

6. 湧水 EC とタンク流出量の関係

各タンクモデルの流出量および総流出量と実測湧水量, 湧水 EC のグラフを図-8 に,降雨前後のタンク総流出量 と EC の変化率のグラフを図-9 に示す.タンク流出量算 定期間の中で日雨量 10mm 以上の降雨があったのは7回 で,それぞれにおいて降雨前後に EC やタンク総流出量 が変化している.変化率は降雨量が多いほど大きく,降 雨量が少ないほど小さい傾向にあることが分かった.ま た,タンク総流出量は湧水の EC 及び EC₂₅とは高い相関 関係(相関係数は EC, EC25 ともに R= -0.92)にあるこ とが分かった.さらに,降雨前後の EC の変化率(=降 雨後 EC/降雨前 EC-1)と,降雨前後のタンク総流出量 の変化率(=降雨後タンク総流出量/降雨前タンク総流 出量-1)についても高い相関関係(相関係数 R=-0.93) にあることが分かった.

各タンクの流出量と EC の変化については 1 段タンク は高い相関関係が見出せるが、2 段タンク、3 段タンク との関係は確認できなかった. このことからも EC の低 下には表面流水の影響が大きいと考えられる.

また,本モデルにおいては、実測湧水量(相関係数 R=0.78)よりタンクモデル総流出量のほうが相関関係は 高かった.

次に、EC に対する降雨の影響が継続する時間を、EC やタンク総流出量が降雨後に降雨前の値に回復するまで 要した期間と考え、データ分析を行った(表-1).最も

長かった期間は、6月21日の観測期間中の最大降雨 (日雨量153.5mm)であり、回復までに約40日間要し ている.それ以降では、回復までに掛かる期間は雨量に かかわらず後半に向かうほど短くなった.観測期間中第 2位の7月1、2日(累計121mm)の降雨では、回復ま でに要した期間は約9日間と短く、降雨量がさらに少な かった6月26日(日雨量55.5mm)の23日間より短く なっている.この原因としては、観測期間の後半は降雨 間隔が3,4日と短く、すでに前の降雨の影響を受けて EC が低下していたため、降雨の影響が少なかったこと が考えられる.また、7月8日、15日の降雨ではEC が 上昇(タンク総流出量は微増もしくは微減)しているが、 これは降雨の影響より回復する復元力の方が勝っていた ためと考えられる.

次に、降雨前の値に回復するまでに要した日数につい て EC とタンク総流出量について比較すると、EC の方 が短い、もしくは同じという結果になった.これは、タ ンク総流出量が降雨前の値に回復したときには、EC は それより早く降雨前の値も回復しているといえる.なお、 EC とタンク総流出量が降雨の影響を受けて変化してい ると判断できる6月21日から7月15日までの降雨期間 を一連の降雨イベント(累計雨量447.5mm)と考えると、 降雨イベント終了時点の7月15日から16日経過した7 月31日において、EC とタンク総流出量は降雨イベント 開始前の6月20日の値に対し、それぞれ98%、107% の割合であった.

これらの結果から, 湧水 EC は降雨と高い関連性があることが分かった.

7. まとめ

本研究では、深層崩壊危険斜面から湧出する湧水 EC と湧水量の観測を実施し、湧水量とタンク総流出量が一 致するようにパラメータ同定を行ったタンクモデルを用 い、湧水 EC とタンク総流出量の降雨後の変化に着目し て、降雨の影響を受けない湧水の EC を精度よく観測す るための条件について明らかにした。

本研究で得られた結論は以下の通りである.

- ・湧水 EC は降雨の影響を受けて変化することが確認された.
- ・ 湧水 EC とタンク総流出量の間には高い関連性がある ことが確認された.
- ・降雨前後の湧水 EC とタンク総流出量の変化率の間に は高い関連性があることが確認された.
- ・湧水 EC とタンク総流出量に対する降雨の影響は、タンク総流出量の方が EC より長い期間継続することが 確認された.

これらの結果より,事前に代表的な危険斜面でタン クのパラメータを同定しておけば,今後の予測雨量 を基にタンクモデルから湧水流出量産出することに より,深層崩壊危険斜面抽出のためのECを精度よく 観測可能な日を推定できる可能性があることが分 かった.

謝辞:本研究における SCE-UA 法によるモデルのパラ メータ同定のプログラムについては,防衛大学校システ ム工学群建設環境工学科の多田准教授が公開しているも のを使用しました.ここに深く謝意を表します.

参考文献

- 松村和樹・藤田正治・山田孝・権田豊・沼本晋也・ 堤大三・中谷加奈・今泉文寿・島田徹・海堀正博・ 鈴木浩二・徳永博・柏原佳明・長野英次・横山修・ 鈴木拓郎・武澤永純・大野亮一・長山孝彦・池島 剛・土屋智:2011年9月台風12号による紀伊半島 で発生した土砂災害:砂防学会誌, Vol.64,No.5,p.43-53,2012
- 森俊勇・坂口哲夫・井上公夫:日本の天然ダムとその対応策,古今書院 pp.89-92,2011
- 3) 和歌山県:和歌山県災害史, 1963
- 4) 地頭薗隆,下川悦朗,寺本行芳:深層崩壊発生場予測法 の提案 - 鹿児島県出水市矢筈岳を例にして - ,砂防学会 誌, Vol.59, No.2,2002
- 5) 菅原正己:流出解析法,共立出版,1972
- 6) 独立行政法人土木研究所:深層崩壊推定頻度マップ
- 7) 今森直紀,田中健貴,木下篤彦,高原晃宙,森加代子,林幸一郎,小川内良人,横山修:紀伊山地における重力変形斜面と水文・水質特性の関連性について:砂防学会研究発表会概要集,2017
- 8) 森加代子,木下篤彦,水野秀明,西岡恒志,今森直 紀,奥山悠木,小川内良人,松村法行,加藤智久: 平成 23 年台風 12 号で発生した深層崩壊地の岩石からのイオン溶出特性:砂防学会研究発表会概要集, 2018
- 9) 土原健雄,奥山武彦,吉本周平,白旗克志,石田 聡:六フッ化硫黄を指標とした山形県七五三掛地す べり地における地下水の年代推定:農業農村工学会 論文集,2014
- 10) 木下篤彦,北川真一,大山誠,小杉賢一朗,内田太郎,小川内良人,横山修:平成23年台風12号で深層崩壊が発生した赤谷地区斜面の水文特性に関する研究:砂防学会研究発表会概要集,2013
- Ishikawa, Y.and Kobatake, S.:Runoff Model for Flood Forecasting, Bull.D.P.R.I, Kyoto Univ., 29, pp.69-73, 1979
- 12) Duan,Q.,Sorooshin, S.and Gupta, V. K.:Effective and efficient global optimaiation for conceptual rainfall-runoff models, *Water Resources Reserch*, Vol.28, No.4, pp.1015-1031,1992
- Duan,Q.,Sorooshin, S.and Gupta, V.K.:Optimal use of SUC-UA global optimization method for calibrating watershed models, *Journal of Hydrology*, Vol.158,pp.265-284,1994