

タンクモデルで推定した地中水量と斜面長・勾配 に基づく深層崩壊発生斜面の特徴

DEEP-SEATED LANDSLIDE FEATURES USING ESTIMATED GROUND WATER
STORAGE, SLOPE LENGTH AND INCLINATION

長谷川 諒¹・田村 隆雄²・武藤 裕則³

Ryo HASEGAWA, Takao TAMURA and Yasunori MUTO

¹徳島大学大学院先端技術科学教育部 (〒770-8506 徳島県徳島市南常三島町 2-1)

E-mail: c501531016@tokushima-u.ac.jp

²徳島大学大学院理工学研究部 (〒770-8506 徳島県徳島市南常三島町 2-1)

E-mail: tamura@ce.tokushima-u.ac.jp

³徳島大学大学院理工学研究部 (〒770-8506 徳島県徳島市南常三島町 2-1)

E-mail: muto_yas@ce.tokushima-u.ac.jp

Key Words: deep-seated landslide, distributed runoff model, ground water storage, slope length, slope inclination

1. はじめに

我が国の山地流域は急勾配な斜面を有している。また毎年襲来する台風によってもたらされる降雨によって、山地流域では斜面内の水分量が増加し、斜面崩壊やそれに伴って発生する土石流といった土砂災害が発生する。

気象庁は、タンクモデルを用いて、降った雨が土壌内にどの程度貯まっているかを示す土壌雨量指数を算出し、それを大雨による土砂災害発生の危険度の高まりを表す指標として用いている。しかし、このタンクモデルは全国一律のパラメータであるため、個々の傾斜地における植生、地質、風化等が考慮されていないことや、比較的表層の地中をモデル化しているため深層崩壊といった地中深い状況を対象としていない、といった問題点¹⁾が挙げられている。

田村ら²⁾は、端野らが考案した地表面流分離直列2段タンクモデル³⁾を組み込んだ分布型流出モデルを用いて、徳島県的那賀川上流域での1976年台風17号時における深層崩壊と2004年台風10号時における表層崩壊を対象に、那賀川流域を66の小流域(小流域1つあたりの面積1.39km²~23.55km², 平均

面積7.49km²)に分割してタンクモデルを割り当て、推定された地中水量から斜面崩壊の評価ができるのではないかと考えた。その結果、2004年の表層崩壊については地下水タンクよりも表層タンクに貯まった水分量が多く、1976年の深層崩壊については表層タンクよりも地下水タンクの水分量が多いということが分かった。そして、2009年の豪雨により表層崩壊が多発した山口県の佐波川流域にも適用⁴⁾して、その結果、那賀川上流域と同様の考察結果を得た。

しかし、佐波川流域で発生した崩壊は表層崩壊のみであり、深層崩壊発生斜面についての議論は十分でない。更に、表層崩壊および深層崩壊が発生する斜面の特徴の一つとして、急勾配な地形を有しているということ⁵⁾が挙げられていることから、タンクモデルを用いた評価法に加えて、斜面の長さおよび勾配といった、地形に関する情報に着目した評価も行えば新たな知見が得られる可能性があると考えられる。

本論文では、過去に那賀川上流域で行われた分布型流出モデルを用いた斜面崩壊評価の手法を、2011年台風12号における豪雨により深層崩壊が発生した和歌山県の二級河川・富田川流域に適用した。そして、富田川流域および那賀川上流域の深層崩壊が



図-1 対象流域の概要および崩壊発生箇所

発生した斜面を含む小流域における、推定された地中水量、斜面長および斜面勾配を基にして、深層崩壊斜面発生斜面の特徴について考察した。

2. 富田川流域と2011年台風12号

解析対象流域は、和歌山県の二級河川・富田川流域で、市ノ瀬流量観測所を基準点とした流域面積169.4km²の流域を対象とする。図-1に解析対象とした富田川流域の概要および2011年台風12号に起因した豪雨によって発生した深層崩壊発生箇所を、図-2に対象流域の地質分布図を示す。対象流域の地質は、本宮断層を境に、北側は音無川層群、南側は牟婁層群に属しており、砂岩と泥岩、それらの互層、そして礫岩により構成されている。

2011年台風12号は、紀伊半島の西側を通過する経路で北上した。この台風の影響により9月2日～4日の期間にかけて、紀伊半島の大部分で2,000mmを超える24時間積算雨量を記録し、3日深夜から4日未明にかけての期間が降雨のピークとなった。この豪雨により、図-1に示す箇所で深層崩壊および土石流が発生した⁷⁾。また、図-2より、崩壊発生箇所の地質は、牟婁層群の礫岩を中心とした層であった。崩壊規模については、崩壊深20m、崩壊幅約130m、崩壊長約550m、流出土砂量約12万m³であり^{7), 8)}、崩壊発生時刻は9月4日午前7時と推定されている⁹⁾。

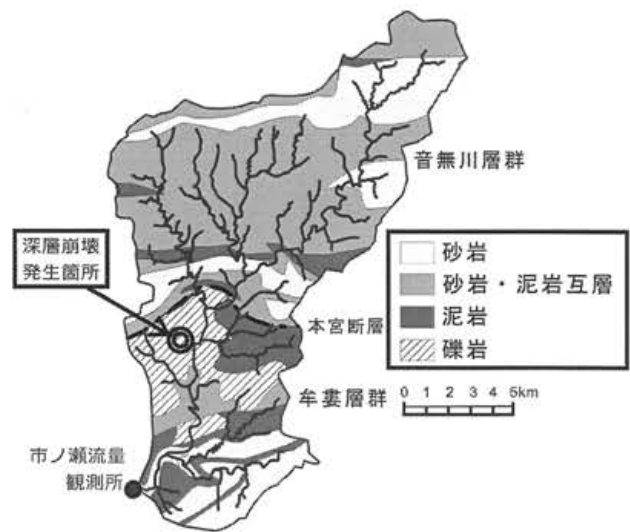


図-2 対象流域の地質分布図⁶⁾

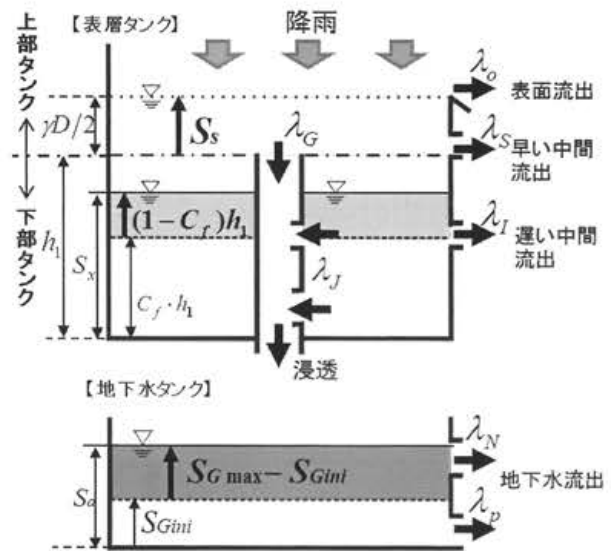


図-3 地表面流分離直列2段タンクモデル

3. 解析手法とモデルの概要

(1) 解析手法

本研究では、地表到達雨量を算出する遮断蒸発モデル^{3), 10)}、小流域の雨水流出過程を表現する地表面流分離直列2段タンクモデル(図-3)、そして河道の流下・合流過程を河道側面からの横流入を考慮した修正 Muskingum-Cunge 法³⁾の3つのモデルで構成される分布型流出モデルを使用した。モデルの詳細とパラメータ同定法についてはそれぞれの参考文献を参照されたい。このモデルを対象流域周辺で観測された水文資料に適用して、起点である市ノ瀬流量観測所のハイドログラフを良好に再現できるモデルパラメータを探索した。その後、発生した深層崩壊とそれを含む小流域の推定地中水量との関連についての議論を行った。

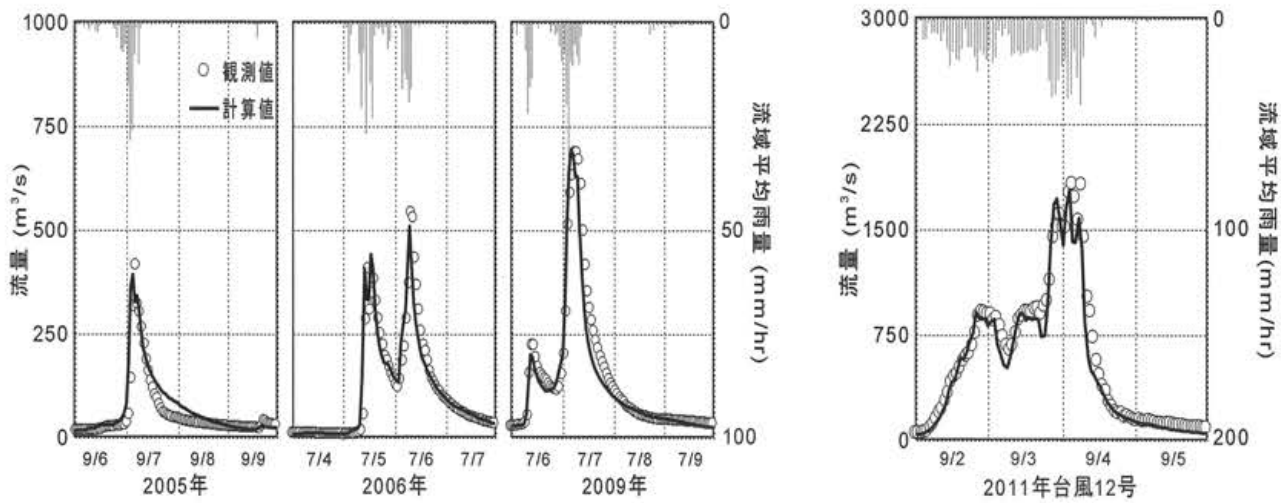


図-7 パラメータ同定の降雨イベントおよび2011年台風12号のヒドログラフ再現結果

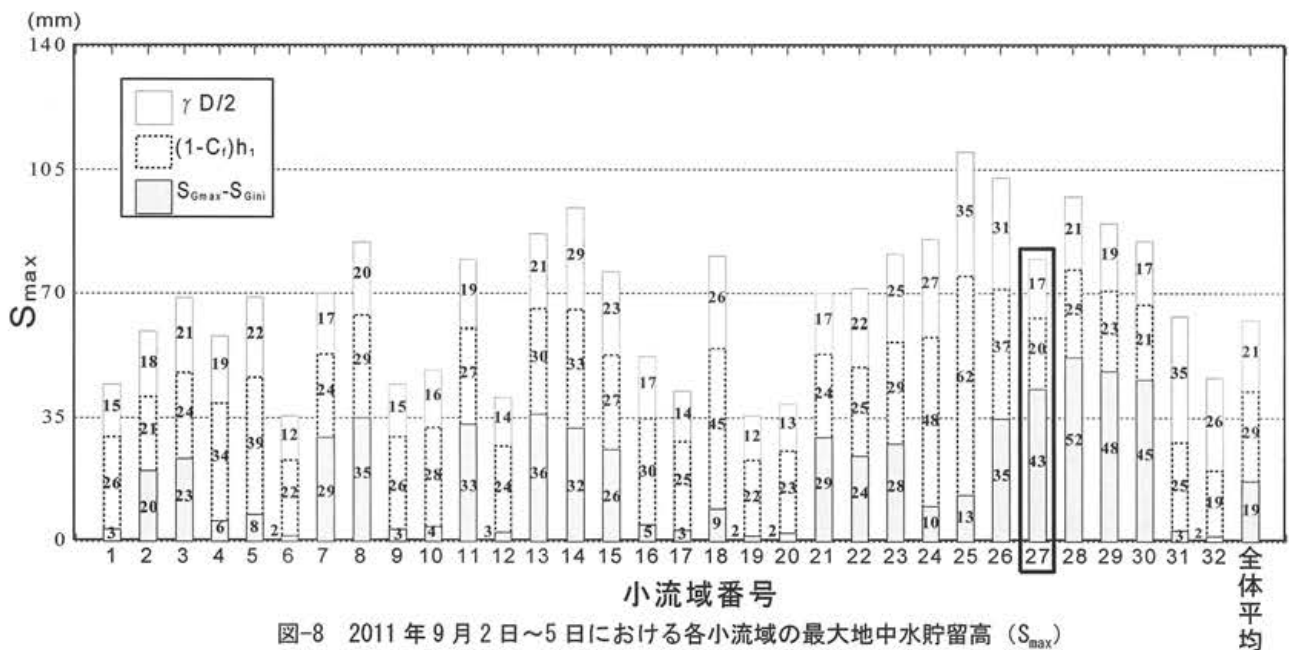


図-8 2011年9月2日～5日における各小流域の最大地中水貯留高 (S_{max})

の初期水深であり、また S_{Gmax} は地下水タンクに貯まった水の量の最大値を表している。降雨開始時を基準とした地中水量の増加量の最大値を最大地中水貯留高 S_{max} とし、以下のように定義する。

$$S_{max} = \gamma D/2 + (1 - C_f)h_1 + (S_{Gmax} - S_{Gini}) \quad (1)$$

解析にあたって、各タンクに初期水深を与える。具体的には計算開始時の河川流量 Q_{ini} は全て地下流出成分 q_{gini} である ($Q_{ini} = q_{gini}$) と考えて地下水タンク貯留高の初期水深 S_{Gini} を与える。表層下部タンクについては、降雨開始後直ちに遅い中間流出が発生するように、圃場容量量にある ($S_x = C_f h_1$) と仮定する。表層上部タンクの水深 (S_s) の初期値は 0 とする。

(3) モデルパラメータの計算条件

市ノ瀬流量観測所流域を表現するために、32個の小流域と、15個の河道からなる分布型流出モデルを作成した。図-4に分割図、図-5に小流域・河道ネットワーク図を示す。タンクモデルを小流域に1つずつ割り当て、各小流域の貯留高を算出した。なお、小流域においては、図-2を参考にして、地質条件が同じ小流域群をまとめて一つのグループとみなし、図-5に示すように、計5グループに分類した。1つのグループでは、タンクモデルのパラメータのうち、洪水流出成分に関わる λ_0 , λ_s , γD , h_1 は各小流域の斜面長と斜面勾配の値に応じて変化させるが、基底流出に関わるパラメータはグループ共通のものを使用する¹¹⁾。

解析に用いる降雨データは図-6に示す流域内外

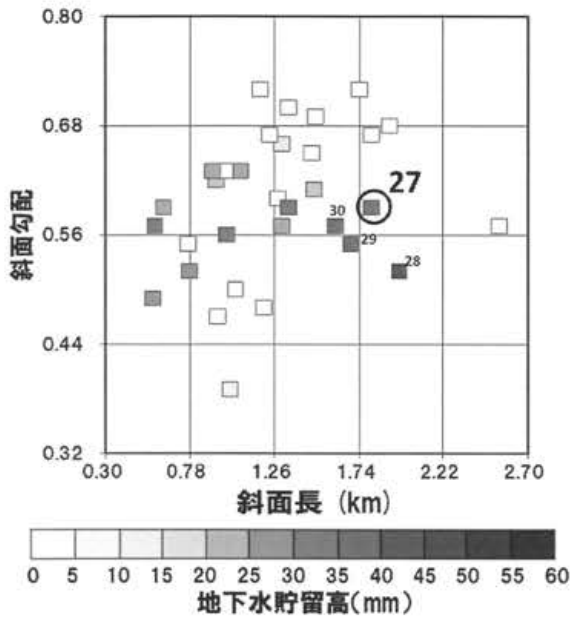


図-9 富田川流域の小流域ごとにおける地下水貯留高と地形データの散布図

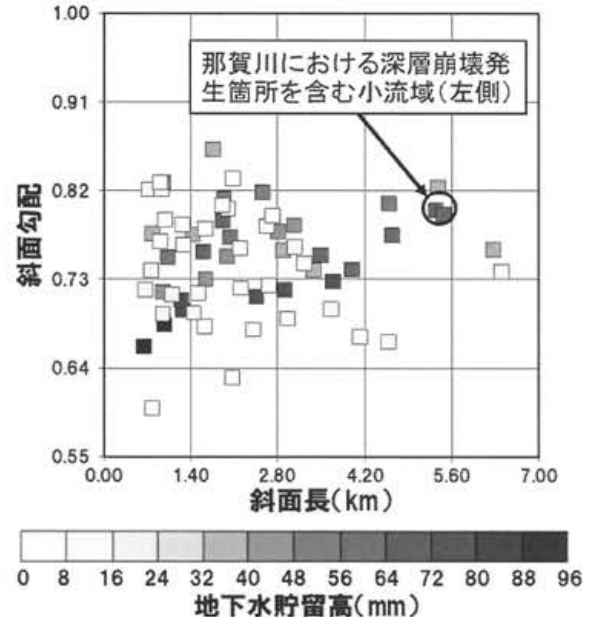


図-10 那賀川上流域の小流域ごとにおける地下水貯留高と地形データ²⁾の散布図

の16箇所の雨量観測所で得られた観測値を用いた。これらの観測所で得られた雨量データに、スプライン補間法¹²⁾を適用し、更に遮断蒸発モデルを用いて小流域毎の地表到達雨量を得た。また、地形データは、小流域の流域面積、斜面長、河道長および河道勾配は1/25,000地形図を用いて求め、斜面勾配は1/25,000地形図の他に等高線延長法¹³⁾を用いた。

4. 解析結果と考察

(1) 同定されたモデルパラメータの妥当性

図-7に、2011年以前に発生した3つの降雨イベントおよび2011年台風12号時のハイドログラフの再現結果を示す。再現結果は全て、同じモデルパラメータ組で得られた結果である。どの期間のハイドログラフにおいても、観測値と計算値のピーク流量誤差は1~6%であり、このモデルパラメータ組は流域の雨水流出機構を良好に再現できていると考える。以上の結果を踏まえて、このモデルパラメータ組を2011年台風12号時の降雨期間における地中水貯留高の算出に適用した。

(2) 地中水の垂直分布と深層崩壊の関連性

図-8に、2011年台風12号時の降雨イベントの期間である9月2日~5日における、各小流域の最大地中水貯留高 S_{max} および早い中間貯留高 $\gamma D/2$ 、遅い中間貯留高 $(1-C_f)h_1$ 、地下水貯留高 $(S_{Gmax} - S_{Gini})$ の推定値の内訳を示す。深層崩壊は27番の小流域内で発生し、崩壊発生箇所の範囲は小流域全体の

1.82%であった。小流域27番の S_{max} について見てみると、 S_{max} の総量は80mmであり、その内訳は、 $\gamma D/2$ が17mm、 $(1-C_f)h_1$ が20mm、 $(S_{Gmax} - S_{Gini})$ が43mmであった。 S_{max} の最大値は、小流域25番の110mmであったが、25番の貯留高の内訳について見ると、 $\gamma D/2$ が35mm、 $(1-C_f)h_1$ が62mmで、表層タンクの貯留高は97mmと推定された。

ここまでのことを踏まえると、富田川流域で発生した深層崩壊については、地中水のうち、地下水貯留高が深く関与しているということが考えられ、那賀川上流域における深層崩壊が発生した斜面と同じであるということが分かった。しかし、 $(S_{Gmax} - S_{Gini})$ について見ると、小流域28番では52mm、29番では48mm、30番では45mmと推定されていることから、28~30番は、崩壊発生斜面を含む27番よりも多くの地下水が貯まっていたことが推定される。そこで本論文では、地下水貯留高の他に、小流域の斜面長および斜面勾配のデータを用いて小流域の地下水貯留高と地形データの関係を調べ、小流域27番の特徴を、地形の面にも着目して考察した。

(3) 小流域の地形に関する特徴について

図-9に、富田川流域における、小流域ごとの地下水貯留高と、斜面長および斜面勾配についての散布図を示す。散布図の点の位置は、斜面長および斜面勾配の値の大小に応じて分布させ、最大地下水貯留高の量に応じて点を色分けしている。崩壊が発生した小流域27番について見てみると、地下水貯留高が40mm以上と推定された小流域群(27~30番)と比

べて斜面長および斜面勾配が大きい。なお、28番は、27番より斜面長が大きい、斜面勾配は小流域群の中で一番小さい。また、27番は、和歌山県の地形分類図では起伏量400m以上600m未満の起伏山地に分類される¹⁴⁾。このことから、深層崩壊発生斜面を含む小流域は、長く、急な勾配の斜面を有する起伏山地であると考えられる。

また、那賀川上流域の地下水貯留高と斜面長および斜面勾配の関係についても調べた。図-10に、那賀川上流域における小流域ごとの地下水貯留高と、斜面長および斜面勾配²⁾についての散布図を示す。1976年の深層崩壊発生箇所を含む小流域は、図-10の丸で示した箇所の左側の点である。崩壊発生箇所を含む小流域は、散布図の中において、60mm以上と推定された小流域の中では斜面長および斜面勾配が大きい。この小流域は、徳島県の地形分類図では、起伏量が600m以上の起伏山地に分類された¹⁵⁾。このことから、那賀川上流域における深層崩壊発生斜面を含む小流域も、富田川流域の小流域27番と同じ特徴があるということが考えられる。

以上のことから、富田川流域と那賀川上流域における深層崩壊発生斜面を含む小流域は、地下水が多く貯まったと推定されたことに加え、起伏山地に分類され、なおかつ長く急な勾配の斜面であることが考えられる。

5. 結論

2011年台風12号時における富田川流域と1976年台風17号時における那賀川上流域において、分布型流出モデルを用いて算出した地中水量の他に、斜面長および斜面勾配を用いて、深層崩壊発生斜面を含む小流域の特徴について考察した。その結果、以下の知見が得られた。

- ① 深層崩壊発生斜面を含む小流域の地下水貯留高は地中水貯留高全体の50%以上の割合を占めていることが推定された。このことから、深層崩壊においては、タンクモデルの地中水貯留高のうち地下水貯留高が重要であることが確認できた。
- ② 深層崩壊発生斜面を含む小流域は、起伏量400m以上の起伏山地であり、斜面長および斜面勾配の値も大きい。

今後は、斜面崩壊発生の危険指標を作成し、崩壊発生の危険性が高まる基準についても考えていく

い。また、これらの手法を用いたハザードマップ作成についても検討していく予定である。

謝辞：本研究を進めるに当たり、各観測所の雨量・流量データを提供して下さいました和歌山県の県土整備部の方々に謝意を表します。

参考文献

- 1) 気象庁, 土壌雨量指数,
<http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/bosai/dojoshisu.html>, 2016.5.29 確認
- 2) 田村隆雄・能田慎也・武藤裕則:分布型流出モデルを用いた那賀川上流における森林斜面の貯水高と斜面崩壊に関する考察, 水工学論文集, Vol.56, pp.469-474, 2012
- 3) 端野道夫・田村隆雄・田淵昌之・富士川洋一:森林流域における遮断蒸発・蒸散量と流域地中保水量の分離・評価法, 水工学論文集, Vol.48, pp.31-36, 2004
- 4) 田村隆雄・上杉明大・武藤裕則:分布型流出モデルを用いた佐波川流域における斜面地中水貯留高と斜面崩壊に関する考察, 第7回土砂災害に関するシンポジウム論文集, pp.205-210, 2014
- 5) 社団法人砂防学会:深層崩壊に関する基本事項に係わる検討委員会 報告・提言, 2012
- 6) 近畿地方土木地質図編纂委員会:近畿地方土木地質図解説書, 財団法人国土技術研究センター, 2003
- 7) 和歌山県:平成23年紀伊半島大水害記録誌, 2013
- 8) 国立研究開発法人土木研究所:平成23年台風第12号災害 道路斜面災害調査速報(和歌山県班), pp.7-15, 2011
- 9) 和歌山県, ようこそ知事室へ 県庁 仕事百景 道路の一日も早い啓開のために(国道311号),
http://www.pref.wakayama.lg.jp/chiji/shigoto/201112_12.html, 2016.5.29 確認
- 10) 元山知範・端野道夫・梅岡秀博:樹幹遮断現象に関する気象要素について, 土木学会第58回年次学術講演会概要集, pp.91-92, 2003
- 11) 田村隆雄・端野道夫・橘大樹:一級中小河川にも適用可能な雨量・水位データを用いた流出解析モデルパラメータの同定手法, 水工学論文集, Vol.50, pp.350-355, 2006
- 12) 桜井明・吉村和美・高山文雄:パソコンによるスプライン関数, 東京電機大学出版局, 1988
- 13) 高瀬信忠:河川水文学, 森北出版, 1978
- 14) 国土庁土地局国土調査課監修:土地分類図(和歌山県), 財団法人日本地図センター, 1974
- 15) 国土庁土地局国土調査課監修:土地分類図(徳島県), 財団法人日本地図センター, 1975

(2016.5.31 受付)