INFLUENCE OF TANK OUTFLOW CALCULATED BY THE TANK MODEL ON SEDIMENT MOVEMENT WITH SHALLOW LANDSLIDES AND DEBRIS FLOWS FROM THE BASIN

木下篤彦¹・野池耕平²・篠原仙充³・荒木義則⁴・杉原成満⁵ Atsuhiko KINOSHITA, Kohei NOIKE, Hisamitsu SHINOHARA, Yoshinori ARAKI and Shigemitsu SUGIHARA

¹正会員 農博 主任研究員 国立研究開発法人土木研究所(〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)
²非会員 理修 交流研究員 国立研究開発法人土木研究所(〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)
³非会員 係長 国土交通省中国地方整備局河川計画課(〒730-8530 広島県広島市中区上八丁堀6-30)
⁴正会員 工博 中電技術コンサルタント株式会社(〒734-8510 広島市南区出汐二丁目3-30)
⁵正会員 工博 中電技術コンサルタント株式会社(〒734-8510 広島市南区出汐二丁目3-30)

In the 2014 Hiroshima disaster, there were differences in the collapse density and sediment discharge volume between granite and mudstone areas. In this study, we clarify the cause of these differences from hydrological observations and calculations using the tank model.

First, we observed water discharge and made hydrological observations at slopes in the granite and mudstone areas. We examined the differences in the hydrological properties. Then, based on the observed results, we fitted the parameters to the tank model. Finally, we simulated the conditions of the 2014 Hiroshima disaster and examined the cause of the differences.

We found that water discharge along the slope in the mudstone area was greater than that in the granite area. This was thought to cause the increased sediment discharge volume in the mudstone area.

Key Words : shallow landslide, debris flow, geological feature, tank model, SCE-UA method

1. はじめに

2014年8月に広島市の広範囲において,表層崩壊・土 石流が発生している¹⁾⁻³⁾.この時,八木・緑井地区では, 同様の降雨ながら,花崗岩と泥岩のエリアで崩壊密度や 平均崩壊面積に倍程度の違いがあり,地質の違いが崩壊 規模に及ぼす影響が示唆された^{2)・3)}.行政機関から一般 に災害予測情報を発信する上では,これらの違いも考慮 に入れる必要があるが,現状では十分検討されていると は言い難い状況である.

これまで、斜面での水文観測事例⁴⁻⁰や降水量から斜 面の水文過程を予測する研究⁷は多数ある.これらの研 究によって、およそ斜面の水文過程は推定できるように なっている.また、H-SLIDER法などで雨量や地形デー タを用いて表層崩壊の発生を予測する技術が開発されて いるが^{8,9}, 土層厚などのパラメータの設定方法などに 課題も多い. その他, 表層崩壊の予測手法としては六甲 山のハチース谷でのタンクモデルを用いた手法が鈴木ら ¹⁰によって提案されており, 各段のタンクの貯留高から 災害の発生の有無を予測できる可能性があることが分 かっている. 既往研究では, 水文過程をいかに崩壊予測 に結びつけるかについての検討が十分でない.

そこで本研究は、現地での水文観測とタンクモデルに よる再現計算の2段階で行う.まず、八木・緑井地区の 花崗岩・泥岩エリアのそれぞれ1流域で水文観測を行う とともに、タンクモデルのパラメータフィッティングを 行う.また、2014年災害時の浸透過程の再現計算を行い、 浸透過程が崩壊規模や土砂流出規模に与えた影響につい て検討した.



図-2 2014年広島災害時の雨量の変化

2. 2014年8月の広島市の災害について

図-1に災害の発生箇所を示す.図-2に災害時の時間雨 量の変化を示す.総雨量は247mm,継続時間は10時間, 最大1時間雨量は87mm/hであったが,70mm/h以上の雨 が降ったのは2時間であり,短時間豪雨による災害と言 える.表-1に広島市八木・緑井地区における花崗岩・泥 岩エリアの崩壊規模・土砂流出規模を示す.崩壊規模に ついて,崩壊密度は花崗岩の方が多い.一方,平均崩壊 面積は泥岩の方が大きい.土砂流出規模について,崩壊 地の土砂侵食量・流下区間の土砂侵食量・単位面積当た りの土砂侵食量はいずれも泥岩エリアの方が大きかった.

3. 花崗岩・泥岩エリアの崩壊斜面の土質特性

花崗岩・泥岩エリアの崩壊斜面の粒度分布について, 花崗岩エリアは50%粒径で0.1~0.8mm程度,泥岩エリア は0.01~0.02mm程度であり,泥岩エリアの粒径の方が小 さかった.図-3に花崗岩エリア・泥岩エリアの崩壊斜面 の土砂の内部摩擦角と粘着力との関係を示す.内部摩擦 角は同程度でφ'=35~40°程度であるが,粘着力は泥岩 の方が大きいことが分かる.透水係数については,花崗 岩・泥岩共大きく外れている材料もあるもののおおむね 10⁶~10⁷(m/s)であり,透水係数については両者の差は小 さいと考えられる.以上から,花崗岩エリアと泥岩エリ

表-1 八木・緑井地区の花崗岩・泥岩エリアの崩壊規模・土 砂流出規模

地質	花崗岩	泥岩
流域面積 (km²)	1.7	1.8
崩壊個数 (個)	111	64
崩壊面積 (km ²)	0.06	0.06
平均崩壊面積 (m²/個)	541	938
崩壊密度 (個/km²)	65	35
崩壊面積率 (%)	3.5	3.6
平均崩壊深 (m)	1.1	1.2
崩壊地の土砂侵食量 (×10 ⁴ m ³)	2.5	3.1
流下区間の土砂侵食量 (×10 ⁴ m ³)	5.4	9.0
崩壊地・流下区間の土砂 侵食量の合計 (×10 ⁴ m ³)	7.9	12.1
単位面積当たりの土砂侵 食量 (×10 ⁴ m ³ /km ²)	4.6	6.7
$\begin{array}{c} 16 \\ 12 \\ 8 \\ 4 \\ 0 \\ 0 \end{array} \begin{array}{c} 0 \\ 20 \end{array}$	●花 ○ ○泥 ○ 40	·崗岩 岩 60
	地山 流域面積 (km²) 崩壊個数 (個) 崩壊面積 (km²) 平均崩壊面積 (m²/個) 崩壊面積 (m²/個) 崩壊面積 (m²/個) 崩壊面積 (m²/個) 崩壊面積率 (%) 平均崩壊深 (m) 崩壊地の土砂侵食量 (×10 ⁴ m³) 減下区間の土砂侵食量 (×10 ⁴ m³) 崩壊地・流下区間の土砂 侵食量の合計 (×10 ⁴ m³) 単位面積当たりの土砂侵 食量 (×10 ⁴ m³/km²)	地員 北尚石 流域面積 (km ²) 1.7 崩壊面積 (km ²) 0.06 平均崩壊面積 (m ² /個) 541 崩壊面積 (m ² /個) 541 崩壊mの土砂侵食量 2.5 (×10 ⁴ m ³) 2.5 流下区間の土砂侵食量 5.4 (×10 ⁴ m ³) 7.9 単位面積当たりの土砂侵 4.6 16 0 12 0 0 20 40

図-3 花崗岩エリア・泥岩エリアの崩壊斜面の内部摩擦角と 粘着力の関係

アの土質特性の違いとしては、粘着力の違いが挙げられることが分かった.

タンクモデルのパラメータフィッティングと 現地の水文特性との関係について

(1) タンクモデルのパラメータフィッティング方法について

2014年広島災害時の花崗岩・泥岩エリアのそれぞれの 水文特性を把握するため、2016年4月より八木・緑井地 区の花崗岩・泥岩のエリアで流量観測や斜面での水文観 測を実施するとともに、既往研究^{2)・3)・11)}を参考にタンク モデルのパラメータフィッティングを行った. 図-4に八 木・緑井地区の花崗岩・泥岩のエリアでの水文観測位置 図を示す. 流量は流域末端に量水堰(四角堰)を設置し、 水位を1時間間隔で計測した. 斜面観測については、土 壤水分計・テンシオメータを地下15cm、30cm、70cm、 150cmに設置し、体積含水率と土壌水分吸引水頭を測定 するととも、にボーリング孔により地下水位の変化を計 測した. なお、設置深さは既往研究⁴⁾⁻⁶⁾を参考にした. また、地下150cmは簡易貫入試験の結果N値50以上で基



図-4 八木・緑井地区の(a)花崗岩エリア・(b)泥岩エリアの水文観測位置図



図-5 SCE-UA法により同定したタンクモデルのパラメータ

岩と判定された深さである.

タンクモデルのパラメータについて、本研究では既往 研究同様^{2)・3}、大域的探索手法としてその有効性が示さ れている最適化手法の一つであるShuffled Complex Evolution Method developed at the University of Arizona (以 下, SCE-UA法¹¹⁾を用いてタンクモデルを構築した. **図**-5に決定した花崗岩タンクモデルのパラメータを示す. パラメータの結果を花崗岩エリアと泥岩エリアで比較す ると、 $\alpha_1 \sim \alpha_4$ がすべて泥岩エリアの方が大きい. この ことは、泥岩エリアの方が降った雨が斜面に沿って流出 しやすいことを意味する. また、 $\beta_2 \cdot \beta_3$ は花崗岩エリ アの方が大きい. このことは花崗岩エリアの方が地下浸

透しやすいことを意味する.

(2) 実際の降雨時の斜面水文観測結果によるタンクモデルの計算結果の検証

タンクモデルのパラメータフィッティングの妥当性を 検証する目的で、花崗岩・泥岩エリアそれぞれについて、 2016年の実際の降雨時の斜面水文観測結果とタンクモデ ルによる計算結果の比較を行った.なお、観測結果と計 算結果の比較事例は2016年で総雨量が最も多かった雨を 対象とした.対象降雨は共に総雨量260mm,最大時間雨 量100mm程度であった.

図-6・7に花崗岩エリアでの再現計算結果、斜面水文 観測結果を示す. 図-6(a)より、降雨と同時に流出量が 増加していることが分かる. (b)より, タンクからの流 出量としては降雨開始と同時に1段目タンクから流出し, 遅れて2段目タンクから流出している.3段目タンクにつ いてはほぼ流出しなかった. (c)より、タンクの貯留高 について、まず1段目が上昇し、遅れて2段目が、最後に 3段目が上昇することが分かった.3段目については降雨 終了後も上昇し続けていることが分かる. (d) より, 鉛 直方向への浸透は、降雨開始後1段目から2段目に浸透し、 遅れて2段目から3段目に浸透したことが分かった.3段 目から下方へはほぼ浸透していない. 図-7(a)より、体 積含水率は、地下15cmは降雨により大きく体積含水率 が上がっているが、それより下層では体積含水率の上昇 はあまり大きくない. (b) について、土壌水分吸引水頭 については、地下70cmまでは水が浸透しているものの、 150cmまでは到達していない. (c)より,降雨による地 下水位の上昇はほぼなかったことが分かる.

図-8・9に泥岩エリアでの再現計算結果,斜面水文観 測結果を示す.図-8(a)から,降雨と同時に流出量が急 激に増加している.(b)から,タンクの1段目の流出量が 多いものの,2・3段目の流出量は多くないことが分かる. (c)・(d)から,タンクの1段目から2段目に浸透するもの の2段目から3段目に浸透しないため、タンクの2段目に 貯留されたことが分かる.図-9(a)から,降雨後に地下 150cmで体積含水率の増加が大きいことが分かる. (b)・(c)から,降雨後水は基岩との境界まで速やかに浸 透し,地下水位が約7cm上昇している.

5. 2014年広島災害の再現計算



図-6 2016年花崗岩エリアでの総雨量最大時の(a)流出量の計 算値と実測値, (b)タンクからの流出量, (c)タンクの貯留 高, (d)タンクからの浸透量

(1) タンクモデルによる再現計算結果

タンクモデルを用いて2014年広島災害時の花崗岩・泥 岩エリアの水文過程の再現計算を行った.図-10に花崗 岩エリアの、図-11に泥岩エリアの再現計算結果を示す. 図-10から、花崗岩エリアでは、流出量が合計で5mmh 程度でほとんどが1段目タンクからの流出であること、 タンク貯留高は1段目から3段目にかけて順に増加するこ と、浸透量は1段目から2段目への浸透が多く、3段目か ら下方へはほとんど浸透していないことが分かった.図 -11から、泥岩エリアでは、流出量が20mm/h程度と花崗 岩に比べて多く、そのほとんどが1段目からの流出であ ることが分かった.また、タンクの貯留高は1段目、遅 れて2段目が急激に上昇していること、タンクからの浸 透について、1段目から2段目へは浸透しているものの、



図-7 2016年花崗岩エリアでの総雨量最大時の(a)体積含水率の変化, (b)土壌水分吸引水頭の変化, (c)地下水位の変化

2段目から3段目,3段目から下方へはほとんど浸透して いないことが分かった.

(2) 花崗岩・泥岩エリアの崩壊規模・土砂流出規模の違いについての検討

表-1より,花崗岩エリアと泥岩エリアの崩壊規模・土 砂流出規模の違いとして,花崗岩エリアは泥岩エリアに 比べて,崩壊密度は大きく平均崩壊面積が小さい.また, 崩壊地・流下区間の土砂侵食量は小さい.土砂流出規模 については,水の流出量がそのまま侵食量に直結すると 考えられ,図-10・11より泥岩の方が流出量が多くなっ ており,計算結果は妥当と考えられる.なお,図-6(a)・図-8(a)のように同様の雨でも泥岩の方が斜面末 端での水の流出量が多くなっており,このことからも泥 岩エリアからの土砂流出量が多くなることが説明できる. 一方,花崗岩エリアが崩壊密度が大きく,平均崩壊面積 が小さい点については水の流出特性からは説明できない. 理由の一つとして図-3のような粘着力の違いがあると考 えられる.この点については,今後,地形・地質の観点 から十分検証する必要がある.



図-8 2016年泥岩エリアでの総雨量最大時の(a)流出量の計算 値と観測値, (b)タンクからの流出量, (c)タンクの貯留高, (d)タンクからの浸透量

6. おわりに

本研究では、2014年広島災害時の花崗岩・泥岩エリア の崩壊・土砂流出規模の違いについて、現地での水文観 測とそれに基づくタンクモデルによる再現計算結果から 明らかにした.得られた成果は以下の通りである.

- タンクモデルによるパラメータフィッティングの結果、花崗岩エリアは地下浸透が卓越していること、 泥岩エリアは斜面に沿った水の流出が卓越すること が分かった。
- 2) 2014年の水文過程の再現計算の結果,泥岩エリアの 方が花崗岩エリアに比べ単位面積当たりの水の流出



図-9 2016年泥岩エリアでの総雨量最大時の(a)体積含水率の変化,(b)土壌水分吸引水頭の変化,(c)地下水位の変化

量が多かったことが分かった.このことは、単位面 積当たりの土砂流出規模が泥岩エリアの方が多かっ たことと調和的である.

花崗岩エリアと泥岩エリアの崩壊規模の違いについては、粘着力の違いが理由の一つとして挙げられる.
ただし、今後、地質・地形学的な側面から更なる検証が必要である.

参考文献

- 海堀正博,石川芳治,里深好文,松村和樹,中谷加奈,長谷 川祐治,松本直樹,高原晃宙,福塚康三郎,吉野弘祐,長野 英次,福田真,中野陽子,島田徹,堀大一郎,西川友章: 2014年8月20日に広島市で発生した集中豪雨に伴う土砂災害, 砂防学会誌,Vol.67, No.4, pp.49-59, 2014.
- 木下篤彦,野池耕平,西岡恒志,筒井和男,福田和寿,村田 雄一,今森直紀,荒木義則:近年発生した表層崩壊の発生規 模と降雨・地質特性との関係に関する研究,河川技術論文集, 第22巻, pp.279-284, 2016.
- 3)木下篤彦,野池耕平,西岡恒志,筒井和男,福田和寿,村田 雄一,今森直紀,荒木義則,倉本和正,島田徹:雨の降り方 の違いが斜面の水文過程と表層崩壊規模に及ぼす影響,第8



図-10 2014年広島災害時のタンクモデルによる花崗岩エリア の再現計算結果. (a) タンクからの流出量, (b) タンク貯留 高, (c) タンクからの浸透量.

回土砂災害に関するシンポジウム論文集, pp.31-36, 2016.

- 4) 岩田直樹,中井真司,片山弘憲,柳崎剛,笹原克夫:平成26 年8月の広島県廿日市市において観測された降雨浸透と斜面 の変形,地盤工学ジャーナル, Vol.10, No.4, pp.623-634, 2015.
- 5) 岩田直樹, 荒木義則, 笹原克夫: 現地計測に基づく降雨に伴うまさ土斜面のせん断変形挙動の評価, 地盤工学ジャーナル, Vol.9, No.2, pp.141-151, 2014.
- 6) 瀧口茂隆,内田太郎,盛伸行,田村圭司:広島西部山系における斜面観測,砂防学会誌,Vol.61,No.2,pp.52-56,2008.
- 7) 小杉賢一朗:斜面における雨水の浸透・流出過程のモデル化, 砂防学会誌, Vol.57, No.3, pp.71-79, 2004.
- 8)秋山怜子,木下篤彦,内田太郎,高原晃宙,石塚忠範:簡易 な水文モデルを用いた崩壊発生時刻予測手法,砂防学会誌,



図-11 2014年広島災害時のタンクモデルによる泥岩エリアの 再現計算結果. (a)タンクからの流出量, (b)タンク貯留高, (c)タンクからの浸透量.

Vol.68, No.2, pp.3-13, 2015.

- 9)内田太郎,盛伸行,田村圭司,寺田秀樹,瀧口茂隆,亀江幸二:場の条件の設定手法が表層崩壊発生箇所の予測に及ぼす影響,砂防学会誌、Vol.62, No.1, pp.23-31, 2009.
- 鈴木雅一,福嶌義宏,武居有恒,小橋澄治:土砂災害発生の危険雨量,砂防学会誌,Vol.31, No.3, pp.1-7, 1979.
- 杉原成満,朝位孝二,倉本和正,荒木義則,古川浩平: SCE-UA法を用いたタンクモデルの最適構造構築に関する一 考察,土木学会論文集F3(土木情報学), Vol.70, No.1, pp.12-17, 2014.

(2017.4.3受付)