

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

RELATIONSHIPS BETWEEN PRECIPITATION, GEOLOGICAL FEATURES,
AND SCALES OF COLLAPSE IN RECENT SHALLOW LANDSLIDES

木下篤彦¹・野池耕平²・西岡恒志³・筒井和男⁴・福田和寿⁵・村田雄一⁶・
今森直紀⁷・荒木義則⁸

Atsuhiko KINOSHITA, Kohei NOIKE, Tsuneshi NISHIOKA, Kazuo TSUTSUI, Kazuhisa
FUKUDA, Yuichi MURATA, Naoki IMAMORI and Yoshinori ARAKI

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 主査 和歌山県庁 (〒649-5302 和歌山県東牟婁郡那智勝浦町市野々3027-6)

⁴正会員 理修 主査 和歌山県庁 (〒649-5302 和歌山県東牟婁郡那智勝浦町市野々3027-6)

⁵非会員 主査 和歌山県庁 (〒649-5302 和歌山県東牟婁郡那智勝浦町市野々3027-6)

⁶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)

⁷非会員 課長 国土交通省紀伊山地砂防事務所 (〒637-0002 奈良県五條市三在町1681)

⁸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)

To reduce damage from shallow landslides, it is important to predict the approximate scale and distribution of collapses based on the expected rain distribution and local geological features. In this study, we investigated relationships between precipitation, geological features, and scales of collapse in six recent shallow landslides. We also used a tank model to calculate the depths of water stored in three tanks and investigated relationships between water depth and the area, number, and scale of collapses.

We found that the area, density, and depth of collapses differed depending on precipitation and geological features. We also found relationships between the depths of water stored in the three tanks and the area, number, and scale of collapses.

Key Words : shallow landslide, precipitation, tank model, SCE-UA method

1. はじめに

近年, 2014年の広島災害, 2011年の那智川災害など大規模な表層崩壊が発生している¹⁾⁶⁾。これらの災害による被害を軽減するには, 予想される降雨分布や地質特性から崩壊発生を予測し, およその崩壊規模や分布を推定し住民避難につなげることが重要である。これまで表層崩壊による災害を個別に調査・研究した事例はいくつかある⁷⁾⁸⁾。一方, 災害の予測技術の向上には複数の災害を比較し, 雨の降り方と表層崩壊の発生の特徴を検証することで予測精度の向上につなげることが重要であるが, 研究事例は少ない。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⁹⁾¹⁰⁾, 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¹¹⁾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。本研究の目的は, 複数の災害の降雨・地質特性と実際に発生した表層崩壊の特徴を比較することで簡易的な崩壊規模の予測に役立てることである。

本研究では, まず, 2014年の広島災害, 2013年の萩・津和野災害, 2011年の那智川災害, 2010年の庄原災害, 2009年の防府災害, 1999年の広島災害を例に挙げ, 災害時の降雨分布や崩壊状況, 地質特性を調査し比較検討を行った。次に, それぞれの災害について, 最大時間雨量と崩壊密度との関係を整理し, 短時間雨量もしくは長時間雨量のどちらが表層崩壊に強く寄与しているかを検討した。最後に, 流量観測の成果から, タンクモデルのパラメータ設定が可能な花崗岩エリア(2014年の広島災害・2009年の防府災害・1999年の広島災害)について,

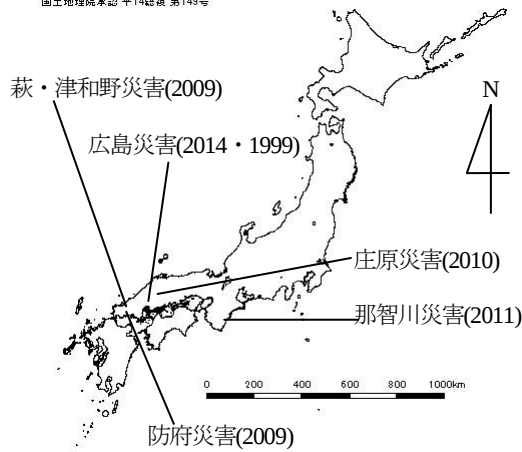


図-1 6つの災害の発生箇所。数字は災害発生年を表す。

災害時の雨から再現計算を行い、計算結果と実際の崩壊規模を比較することでタンクモデルにより崩壊規模を予測する手法を提案する。

2. 各災害の降雨特性について

図-1に6つの災害の発生箇所を示す。図-2に6つの災害の時間雨量と累加雨量を示す。これらの降雨の特徴をまとめると表-1のようになる。なお、総雨量とは、災害発生時の降雨で前後に24時間以上の無降雨時間のある一連の降雨の合計である。また、先行雨量とは、上記の一連の降雨が始まる時点より前の30日間の雨量の合計値である。総雨量では、那智川災害が833mmと圧倒的に多い。一方、庄原災害は総雨量が174mmと少ない。最大1時間雨量で見ると萩・津和野災害が138mm/hと最も多く、庄原災害が72mm/hと最も少ない。先行雨量で見ると庄原災害は552mmと圧倒的に多く、防府災害が56mmと最も

小さい。また、萩・津和野災害について、一連降雨前の無降雨日数が多いのが特徴として挙げられる。

3. 各災害の崩壊特性について

表-2に各災害発生箇所における表層崩壊の崩壊規模を示す。まず、総雨量が最も多かった那智川災害について、平均崩壊面積、平均崩壊深は最も大きかったが、崩壊密度、崩壊面積率は最も小さい。この災害では降雨は4日間にわたり降り続いていたことから、雨水が広い範囲で地下深くまで浸透したため、崩壊深が大きくなるとともに1個1個の崩壊規模も大きくなったと考えられる。総雨量は少なかったものの先行雨量の多かった庄原災害については、崩壊密度や崩壊面積率が最も大きくなっている。平均崩壊深が1.0m程度、平均崩壊面積が273m²/個とそれほど大きくなかったことと合わせると、先行降雨が多かったものの、災害時は3時間程度の降雨だったことから、雨水が地下深くまで浸透せず、崩壊深がそれほど大きくならなかったと考えられる。このため、崩壊個数が多くなり崩壊面積は大きくなったものの、1個1個の崩壊規模は小さかった。萩・津和野災害については平均崩壊面積、平均崩壊深が最も小さい。これについても短時間の集中的な降雨により地下に雨水が十分浸透しなかったことが考えられる。その他、2014年の広島災害については花崗岩の方が泥岩に比べ崩壊密度が大きいものの平均崩壊面積は小さくなっている。この災害は約3.5km²の狭いエリアであったため雨の降り方は概ね同様であり、地質や地形条件の違いが崩壊規模の違いにつながっていると考えられる。

表-1 各災害発生箇所の地質及び降雨特性

災害名	広島災害 (2014年)	萩・津和野災害 (2013年)	那智川災害 (2011年)	庄原災害 (2010年)	防府災害 (2009年)	広島災害 (1999年)
災害発生 推定時刻	8月20日 3:30~4:00頃	7月28日 12:00頃	9月4日 1:30~3:00頃	7月16日 17:00頃	7月21日 11:30~12:00頃	6月29日 15:30~16:00頃
地質	花崗岩・泥岩	流紋岩質凝灰岩	花崗斑岩・泥岩	流紋岩質凝灰岩	花崗岩	花崗岩
本研究での検 討対象エリア	八木・緑井地 区	須佐川流域	那智川流域	篠堂川流域	剣川流域	荒谷川流域
近隣の雨量観 測所	高瀬観測所 (国土交通省)	須佐観測所 (気象庁)	新宮観測所 (気象庁)	大戸観測所 (広島県)	防府観測所 (気象庁)	八幡川橋観測所 (日本道路公団)
総雨量(mm)	247	351	833	174	332	234
継続時間(hr)	10	11	88	4	21	23
最大1時間雨 量(mm/h)	87	138	132	72	64	81
先行雨量 (mm)	301	216	388	552	56	157
一連降雨前の 無降雨日数 (日)	3	20	6	1	2	3

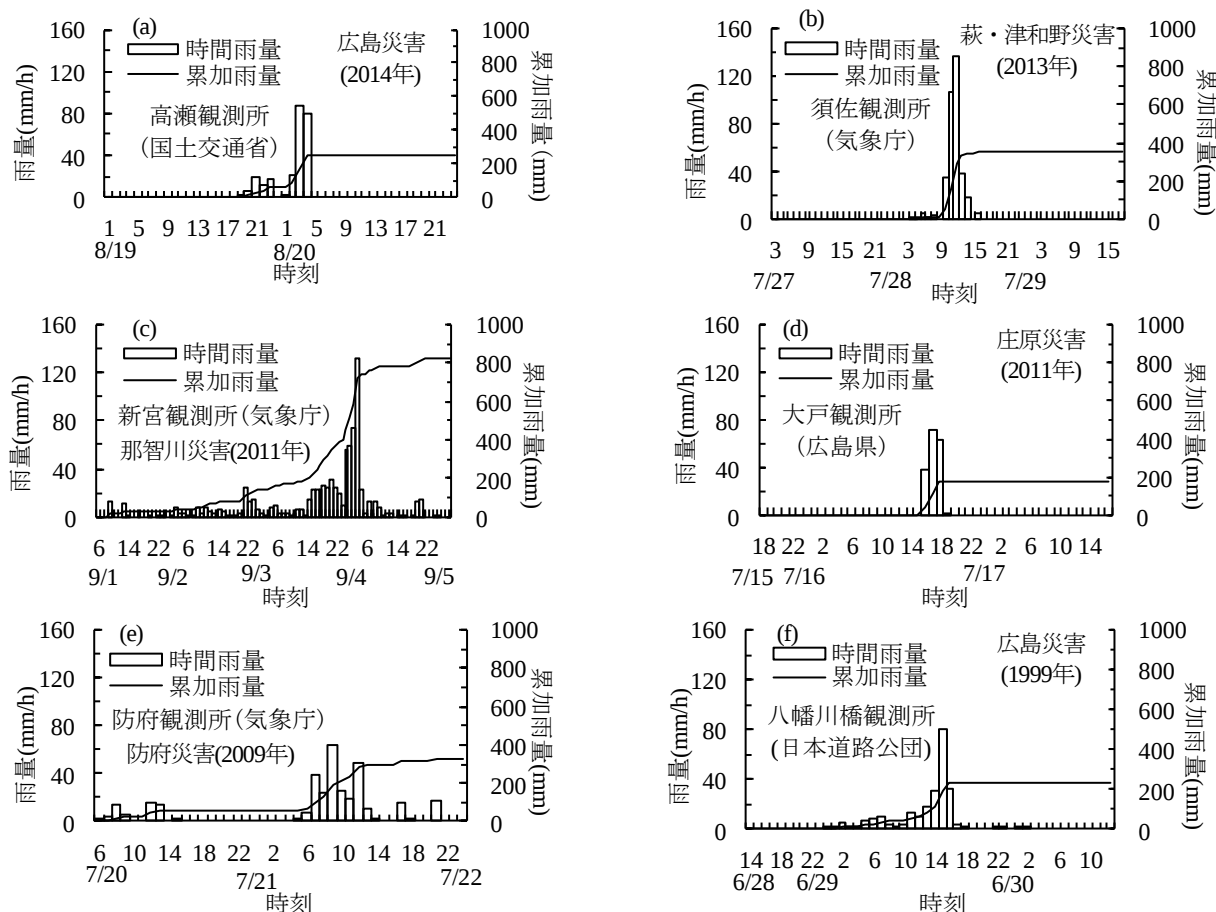


図-2 6災害の災害時の時間雨量の変化。(a)2014年広島災害、(b)2013年萩・津和野災害、(c)2011年那智川災害、(d)2010年庄原災害、(e)2009年防府災害、(f)1999年広島災害。

4. 降雨と崩壊密度との関係について

図-2、表-1に示す通り、表層崩壊は短時間降雨、長時間降雨、先行降雨など様々な要因により発生している。このため、どの要因が最も寄与しているかは表層崩壊の発生場所ごとにいくつかの最大時間雨量について時間雨量と平均崩壊密度との関係を整理し、雨量と崩壊密度との関係が比例関係にある場合その最大時間雨量が崩壊に

寄与していると考えられる。本研究では、表-1の6つの災害について気象庁の解析雨量を用いて1kmメッシュごとに1, 2, 3, 6, 12, 24, 48, 72時間の最大雨量について雨量と平均崩壊密度との関係を整理した。図-3に結果の一例を示す。なお、どの災害も最大1, 24時間最大雨量を例示しているが、庄原災害については1～48時間最大雨量の結果が同様であったため、1, 72時間最大雨量の結果を例示している。

2014年広島災害、那智川災害と防府災害は1時間雨量と崩壊密度との関係性が強く24時間雨量との関係性が低

表-2 各災害発生箇所における表層崩壊の崩壊規模

災害名	広島災害 (2014年)		萩・津和野災害 (2013年)	那智川災害 (2011年)	庄原災害 (2010年)	防府災害 (2009年)	広島災害 (1999年)
本研究での検討対象 エリア	八木・緑井地区		須佐川流域	那智川流域	篠堂川流域	剣川流域	荒谷川流域
地質	花崗岩	泥岩	流紋岩質凝灰岩	花崗斑岩・泥岩	流紋岩質凝灰岩	花崗岩	花崗岩
流域面積(km ²)	1.7	1.8	6.5	13.4	4.1	1.8	4.0
崩壊個数(個)	111	64	371	71	587	138	85
崩壊面積(km ²)	0.06	0.06	0.09	0.06	0.16	0.05	0.05
平均崩壊面積(m ² /個)	541	938	243	873	273	362	588
崩壊密度(個/km ²)	65	35	57	5	142	77	21
崩壊面積率(%)	3.5	3.6	1.4	0.5	4.0	2.8	1.2
平均崩壊深(m)	1.1	1.2	0.8	2.1	1.0	1.0	1.1

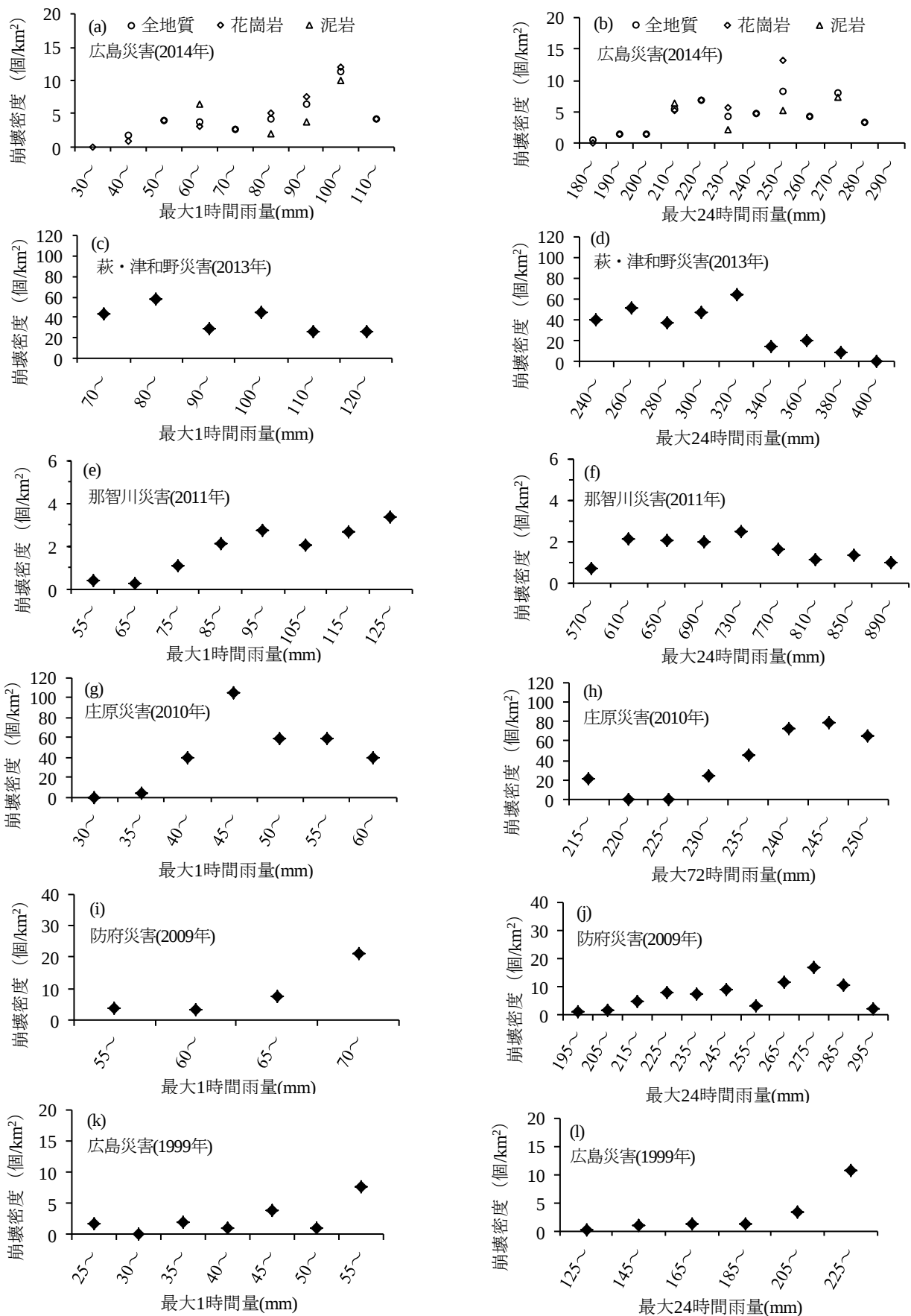


図-3 6災害の短時間雨量もしくは長時間雨量と崩壊密度との関係。2014年広島災害の(a)最大1時間雨量, (b)最大24時間雨量。2013年萩・津和野災害の(c)最大1時間雨量, (d)最大24時間雨量, 2011年那智川災害の(e)最大1時間雨量, (f)最大24時間雨量, 2010年庄原災害の(g)最大1時間雨量, (h)最大72時間雨量, 2009年防府災害の(i)最大1時間雨量, (j)最大24時間雨量, 1999年広島災害の(k)最大1時間雨量, (l)最大24時間雨量。

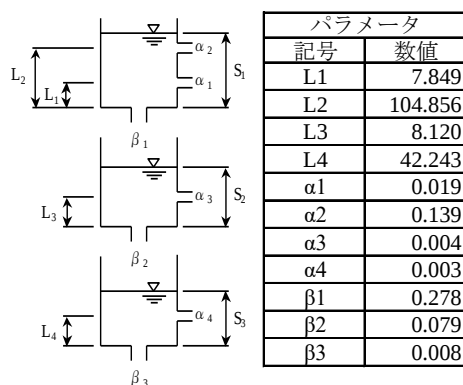


図-4 SCE-UA法により同定した花崗岩タンクモデル

い。特に那智川災害は4日間にも及ぶ長期の雨であったが、短時間雨量が崩壊に寄与している。萩・津和野災害については1, 24時間雨量ともに崩壊密度と関係性が低い。無降雨日数が20日と長く短時間に強い雨が降ったことから、ある一定量の雨量を超えた箇所ですまんべんなく崩壊が発生したと考えられる。庄原災害については1～48時間までは最大時間雨量と崩壊密度との関係性が低かったが、72時間では関係性が高くなった。先行雨量が多かったこと災害時の総雨量が174mmと他の災害に比べて小さかったことから先行雨量が災害の発生に寄与している。1999年広島災害は1, 24時間雨量ともに崩壊密度と比例関係にある。短時間・長時間降雨の両方が崩壊に寄与している。

5. 水文条件と崩壊密度との関係について

崩壊が発生するには短期降雨、長期降雨、先行雨量などが関係している。このため、図-3の短・長時間雨量と崩壊密度との関係を説明するためには降雨による水文過程を考える必要がある。そこで本研究では、タンクモデルを用いた水文過程の再現計算を行った。表-1の6つの災害のうち1999年の広島災害については災害後発生箇所において林外雨量計による雨量観測と小規模溪流（地質：花崗岩、流域面積：0.09km²）の谷出口部に設置したパーシャルフリュームによる流量観測（2005年～2014年）を行っている。このため、花崗岩地質の小規模溪流における雨量・流量観測データに基づいたタンクモデルのパラメータの設定が可能である。そこで本研究では、タンクモデルのパラメータ同定について、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^{12)・13)}）を用いてタンクモデルを構築した。図-4に花崗岩タンクモデルのパラメータを示す。なお、計算は1km²のメッシュごとに行った。次に、このパラメータを用いて地質が花崗岩である2014年広島災害、2009年防府災害、1999年の広島災害の水文過程の再現計算を行った。

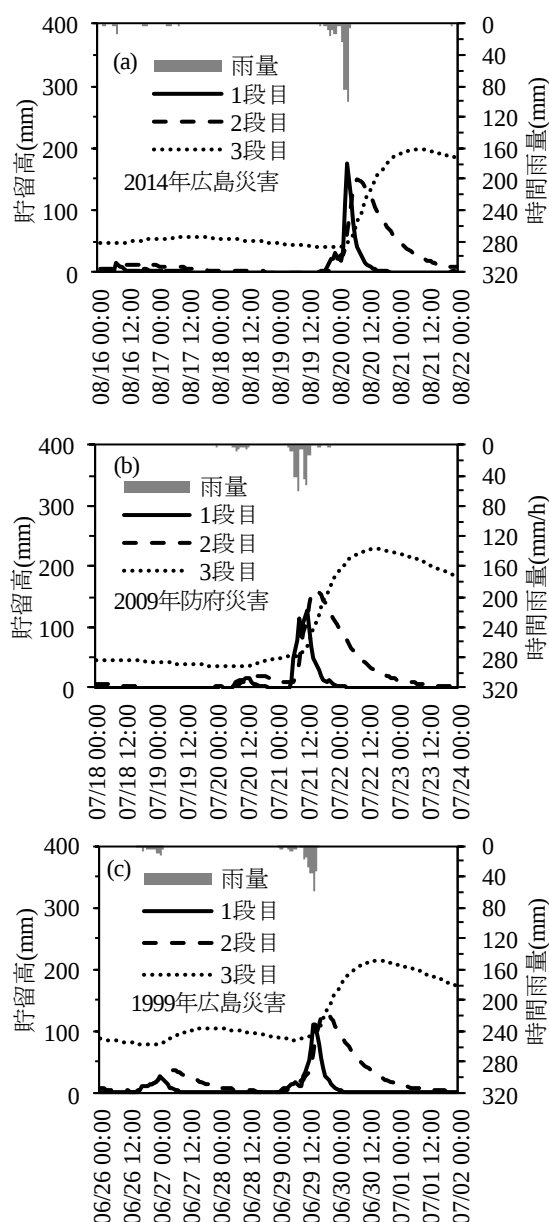


図-5 (a)2014年広島災害、(b)2009年防府災害、(c)1999年広島災害のタンクモデルによる再現計算結果

図-5に計算結果を示す。2014年広島災害について、降雨強度の急激な上昇により1段目タンクの貯留高も急激に上昇している。2009年防府災害について、降雨強度の上昇に伴い1段目タンクとともに2段目タンクの貯留高の上昇が見られる。1999年広島災害について、3段目タンクの貯留高が災害発生前から高く、降雨によってさらに高くなっていることが分かる。災害発生時のタンク貯留高を見ると、2014年広島災害は1段目タンク貯留高が突出していることが分かる。2009年防府災害は1段目タンクに加え、2段目タンク貯留高が高くなっていることが分かる。1999年広島災害は、1段目タンク貯留高に加え、3段目タンク貯留高も高くなっていることが分かる。これらの結果を表-2の表層崩壊の崩壊規模、図-3の短・長時間雨量と崩壊密度との関係の結果と合わせて考察すると、2014年広島災害、2009年防府災害の特徴としては、

短時間雨量と崩壊密度の相関が良いこと、崩壊密度・崩壊面積率が高いことが上げられる。1・2段目タンクは、表面流に寄与すると考えられることから、崩壊密度・崩壊面積率が高くなった。1999年広島災害の特徴としては、短時間降雨・長時間降雨の両方と崩壊密度の相関が良いこと、平均崩壊面積が大きいものの崩壊密度・崩壊面積率が低いことが挙げられる。3段目タンクは地下水に寄与すると考えられ、そもそも降雨前から3段目タンクの貯留高すなわち地下水位が高かったことが考えられ、全体の崩壊個数や面積は小さかったものの、1個1個の崩壊の大きさは大きかったと考えられる。以上から、1・2段目タンクの貯留高が大きいと表面流により崩壊密度や面積が大きくなること、3段目タンクの貯留高が大きいと高い地下水位により1個1個の崩壊の大きさは大きくなると考えられる。

6. おわりに

本研究では、近年の複数の表層崩壊による災害の降雨・崩壊特性を比較するとともにタンクモデルによりタンクの貯留高と崩壊密度・面積や崩壊規模との関係性について検討した。得られた成果は以下の通りである。

- 1) 6つの災害の崩壊特性から、雨の降り方や地質の違いにより崩壊面積・崩壊密度・崩壊深に違いが出ることが分かった。
- 2) 降雨と崩壊密度との関係については、短時間降雨と相関のある災害、長時間降雨と相関のある災害、両方と相関のある災害、両方とも相関性の低い災害があり、これらは災害時の雨の降り方や先行降雨と関係のあることが分かった。
- 3) タンクモデルを用いた再現計算の結果、1・2段目タンクの貯留高が大きいと表面流により崩壊密度や面積が大きくなること、3段目タンクの貯留高が大きいと高い地下水位により1個1個の崩壊の大きさは大きくなる可能性があることが分かった。ただし、タンクモデルを用いた崩壊規模の推定にはさらなる水文観測やタンクモデルの精度向上、実際の災害での妥当性の検証が欠かせない。

謝辞

本研究の遂行に当たっては平成26年度河川整備基金の援助を受けました。ここに記して感謝いたします。

参考文献

- 1) 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.

- 2) 海堀正博, 木下篤彦, 高原晃宙, 多田泰之, 長野英次, 馬場茂彰, 荒木義則, 杉原成満, 島田徹, 堀大一郎, 小泉和也: 2013年7月28日に山口県東部および島根県西部で発生した局地的集中豪雨による土砂災害, 砂防学会誌, Vol.66, No.4, pp.48-55, 2013.
- 3) 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, pp.43-53, 2012.
- 4) 海堀正博, 杉原成満, 中井真司, 荒木義則, 山越隆雄, 林真一郎, 山下祐一: 2010年7月16日に発生した広島県庄原市の土砂災害の緊急調査報告, 砂防学会誌, Vol.63, No.4, pp.30-37, 2010.
- 5) 古川浩平, 海堀正博, 久保田哲也, 地頭蘭隆, 権田豊, 杉原成満, 林真一郎, 池田曉彦, 荒木義則, 柏原佳明: 2009年7月21日山口県防府市での土砂災害緊急調査報告, 砂防学会誌, Vol.62, No.3, pp.62-73, 2009.
- 6) 海堀正博, 石川芳治, 牛山素行, 久保田哲也, 平松晋也, 藤田正治, 三好岩生, 山下祐一: 1999年6月29日広島土砂災害に関する緊急調査報告(速報), 砂防学会誌, Vol.52, No.3, pp.34-43, 1999.
- 7) 瀬尾克美, 平川泰之, 天野篤, 小橋澄治, 菊井稔宏, 川満一史: 1998年8月末福島県南部災害における崩壊と降雨の関係, 砂防学会誌, Vol.53, No.5, pp.17-25, 2001.
- 8) 大石博之, 八木俊夫, 竹本大昭, 荒木義則, 榊原弘之, 古川浩平, 浦真: 統計手法を利用した1999年6月29日広島県西部における土砂災害発生状況と降雨・地形要因の関連についての考察, 砂防学会誌, Vol.58, No.6, pp.3-10, 2006.
- 9) 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, Vol.68, No.2, pp.3-13, 2015.
- 10) 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.
- 11) 鈴木雅一, 福嶋義宏, 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.
- 12) 杉原成満, 福田慎哉, 倉本和正, 荒木義則, 朝位孝二, 古川浩平: SCE-UA法を用いたタンクモデルの構築とそれを用いた土砂災害発生危険基準線の設定, 土木学会論文集F6(安全問題), Vol.67, No.1, pp.1-13, 2011.
- 13) 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.

(2016. 4. 4受付)