

豪雨時における土砂災害危険度予測への 修正タンクモデルの適用性について

ADAPTABILITY OF MODIFIED TANK MODEL TO SEDIMENT DISASTER RISK PREDICTION IN HEAVY RAIN

日置 和昭¹・青木 一男¹・中村 聡司²

Kazuaki HIOKI, Kazuo AOKI and Satoshi NAKAMURA

¹大阪工業大学工学部 (〒535-8585 大阪市旭区大宮 5-16-1)

E-mail: hioki@civil.oit.ac.jp

²大阪工業大学大学院工学研究科 (〒535-8585 大阪市旭区大宮 5-16-1)

Key Words: modified tank model, heavy rain, sediment disaster, risk prediction

1. はじめに

豪雨時における土砂災害危険度を予測する手法の一つに、不飽和帯の貯留量に着目した水文学的方法がある。この方法は、降雨による土砂災害は不飽和帯の貯留量に依存すると考え、対象とする地域や斜面の限界貯留量(土砂災害が発生する限界の貯留量)を求めようとするものであり、代表的なものにタンクモデルによる道しら¹⁾の方法がある。

タンクモデルとは、雨水が不飽和帯に貯留されることによって降雨の地下水への影響が累積され、またある程度は遅れるという考え方のもとに、不飽和帯の雨水貯留をモデル的に示したものである。一般に、土砂災害危険度予測には3段直列タンクモデルが用いられ、レーダー・アメダス解析雨量から土壌雨量指数²⁾が算出される際にも、3段直列タンクモデルが適用されている。しかし、従来のタンクモデルでは、雨水浸透に伴う不飽和浸透特性の物理的変化が考慮されていないため、不飽和性が強い(すなわち、地下水涵養の発生に時間的遅れが大きい)場合に地下水涵養機構の再現が困難となるなどの問題点がある³⁾。そのため、筆者ら⁴⁾は、貯留高変動に伴う流出率の変化を考慮した2段直列のタンクモデル(以下、修正タンクモデルと称す)を提案している。

本論文では、豪雨時における土砂災害危険度予測への修正タンクモデルの適用性について種々の検討を行った。

2. 修正タンクモデルの構造

修正タンクモデルの構造の概念図を図-1に示す。修正タンクモデルとは、タンクモデルの貯留高を体積含水率、流出率を不飽和透水係数とみなし、流出率が貯留高の変動に伴って変化する2段直列のタンクモデルのことで、各タンクの流出率 α_1^n 、 α_2^n が前時間ステップにおける貯留高 β_1^{n-1} 、 β_2^{n-1} の関数で表わされる。関数形としては、簡単のため1次式を仮定した。1段目タンクの流出率は、次のように表すことができる。

$$\alpha_1^n = a_{12} \quad (0 \leq \beta_1^{n-1} \leq a_{11}) \quad (1)$$

$$\alpha_1^n = a_{13} \times (\beta_1^{n-1} - a_{11}) + a_{12} \quad (a_{11} \leq \beta_1^{n-1}) \quad (2)$$

ただし、図-1に示すように、式(2)において $\alpha_1^n \geq 1$ となる場合は、 $\alpha_1 = 1$ とする。

ここに、 α_1^n : 流出率、 β_1^{n-1} : 前時間ステップにおける貯留高、 a_{11} 、 a_{12} 、 a_{13} : 定数である。

2段目についても同様に、次のように表せる。

$$\alpha_2^n = a_{22} \quad (0 \leq \beta_2^{n-1} \leq a_{21}) \quad (3)$$

$$\alpha_2^n = a_{23} \times (\beta_2^{n-1} - a_{21}) + a_{22} \quad (a_{21} \leq \beta_2^{n-1}) \quad (4)$$

ただし、図-1 に示すように、式(4)において $\alpha_2^n \geq 1$ となる場合は、 $\alpha_2 = 1$ とする。

ここに、 α_2^n : 流出率、 β_2^{n-1} : 前時間ステップにおける貯留高、 a_{21} 、 a_{22} 、 a_{23} : 定数である。

また、各タンクからの流出量は、次式となる。

$$q_1 = \alpha_1^n \times \beta_1^n \quad (5)$$

$$q_2 = \alpha_2^n \times \beta_2^n \quad (6)$$

ここに、 q_1 、 q_2 : 流出量、 β_1^n 、 β_2^n : 各時間ステップにおける貯留高である。

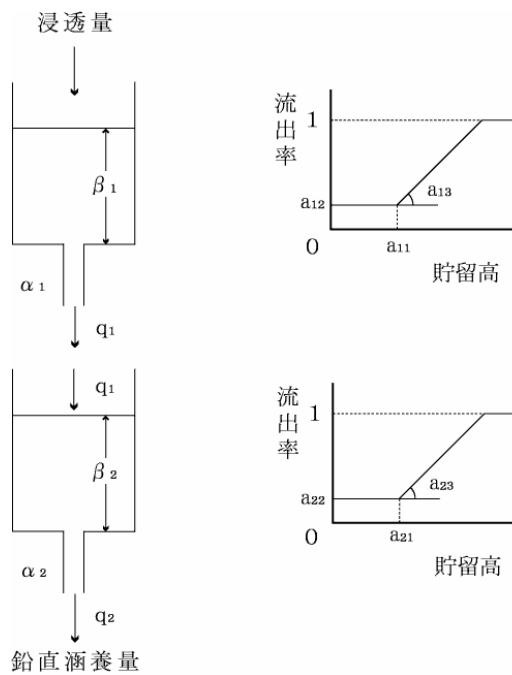


図-1 修正タンクモデルの構造の概念図

修正タンクモデルは、従来のタンクモデルを拡張したもので、 a_{13} 、 a_{23} の値がゼロになると流出率が一定となり、従来のタンクモデルと等価になる。

3. 流出率を規定する各パラメータの設定

修正タンクモデルの流出率を規定する各パラメータおよび初期貯留高 β_1^0 、 β_2^0 は、不飽和浸透理論に基づく地下水涵養機構を再現可能なパラメータとした。すなわち、不飽和浸透理論に基づいて鉛直1次元不飽和浸透解析により求めた地下水涵養量を観測値とみなし、修正タンクモデルの各パラメータを同定した。同定手法としては、定式化の容易さなどから間接法を採用し、未知パラメータを仮定して得られた解析値と観測値との残差二乗和を最小にするパラメータを、タンクモデルの同定に用いられた実績^{5),6)}のある Powell の共役方向法により推定した。なお、鉛直1次元不飽和浸透は Richards⁷⁾の式に従うものとし、水分保持特性曲線ならびに不飽和透水係数は van Genuchten モデル⁸⁾により設定した。

解析モデルとして 300cm の砂柱を考え、不飽和浸透特性としては、様々な不飽和浸透特性に対する修正タンクモデルの適応性を評価するため、表-1 を想定した。なお、不飽和浸透特性は van Genuchten 定数 (α , n) によって表され、 α 、 n ともに大きい値を示すほど、不飽和性が強いと言える。また、境界

表-1 不飽和浸透パラメータ一覧

	α (cm ⁻¹)	n	θ_s	θ_r
case1	0.0100	1.500	0.500	0.100
case2	0.0200	1.500	0.500	0.100
case3	0.0300	1.500	0.500	0.100
case4	0.0100	2.000	0.500	0.100
case5	0.0200	2.000	0.500	0.100
case6	0.0300	2.000	0.500	0.100
case7	0.0100	2.500	0.500	0.100
case8	0.0200	2.500	0.500	0.100
case9	0.0300	2.500	0.500	0.100

※飽和透水係数 k はいずれのケースも、 $k = 1.00 \times 10^{-2}$ cm/sec とした。

表-2 修正タンクモデルの流出率を規定する各パラメータの同定結果一覧

	a_{11} (mm)	a_{12}	a_{13} (mm ⁻¹)	β_1^0 (mm)	a_{21} (mm)	a_{22}	a_{23} (mm ⁻¹)	β_2^0 (mm)
case1	40.011	0.0000	0.0021	40.053	62.782	0.0000	0.0014	60.125
case2	28.420	0.0000	0.0006	29.413	69.663	0.0000	0.0013	10.032
case3	10.002	0.0000	0.0001	10.032	56.934	0.0000	0.0008	13.211
case4	34.110	0.0000	0.0017	30.062	69.920	0.0000	0.0011	70.032
case5	30.052	0.0000	0.0002	28.917	66.680	0.0000	0.0011	9.990
case6	11.252	0.0001	0.0001	10.984	72.909	0.0000	0.0007	14.999
case7	30.136	0.0000	0.0007	30.120	73.033	0.0000	0.0011	30.032
case8	20.654	0.0000	0.0001	20.026	58.793	0.0000	0.0010	10.032
case9	17.009	0.0001	0.0001	17.165	63.511	0.0000	0.0004	10.651

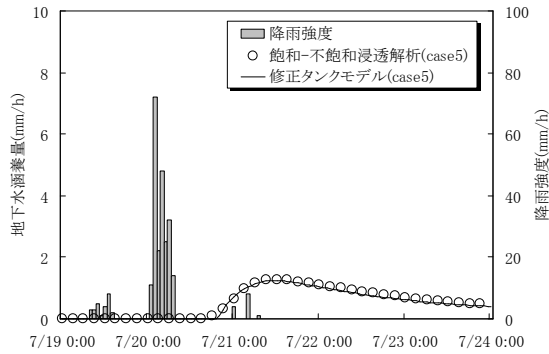


図-2 同定結果の一例[case5]

条件は、上端から浸透量（ここでは、便宜的に降雨量の50%を浸透量と仮定した）を与え、下端は圧力水頭を0cmで固定した。初期圧力水頭分布は $\phi = -z$ とし、降雨は2003年7月（19日午前0時から24日午前0時まで）に熊本県水俣市南福寺で観測された雨量データ⁹⁾を用いた。

鉛直1次元不飽和浸透解析により求めた地下水涵養量（ここでは、観測値とみなす）に基づいて、修正タンクモデルの各パラメータを同定した結果一覧を表-2に示す。また、同定されたパラメータを用いて順解析を行い求めた地下水涵養量と観測値を比較した結果の一例（case5）を図-2に示す。これによると、両者は良く一致しており、良好な再現性が示された。なお、紙面の都合上、その他のケースについては省略したが、いずれのケースについてもcase5と同様、良好な再現性が示され、修正タンクモデルは、不飽和性が強い場合、弱い場合の両者に対して適応することが確認された。また、修正タンクモデルは、従来のタンクモデルと比較して、不飽和性が強い場合ほど、有効となることが確認されている³⁾。

次に、表-1に示したcase2, case5, case8 ($\alpha=0.0200$, $n=1.500, 2.000, 2.500$)に相当する修正タンクモデルの各パラメータを用いて順解析を行い求めた地下水涵養量の経時変化を図-3に、またcase4, case5, case6 ($n=2.000$, $\alpha=0.0100, 0.0200, 0.0300$)に相当する修正タンクモデルの各パラメータを用いて順解析を行い求めた地下水涵養量の経時変化を図-4に示す。これによると、地下水涵養機構は設定するパラメータによって大きく異なることを確認できる。

4. 土砂災害危険度予測への適用性

修正タンクモデルの土砂災害危険度予測への適用性について検討するため、第1タンク（表層付近）

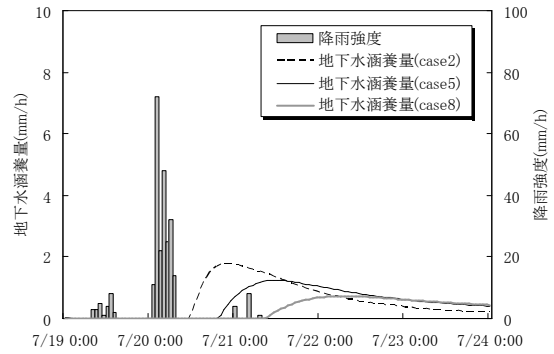


図-3 地下水涵養量の経時変化[case2, case5, case8]

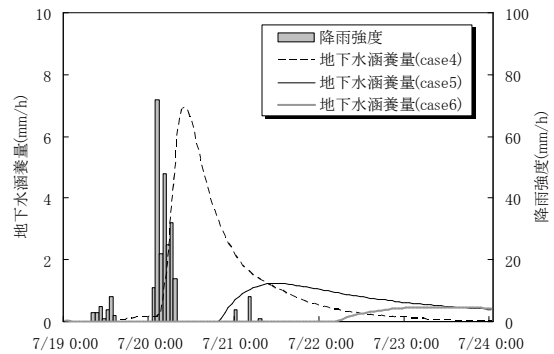


図-4 地下水涵養量の経時変化[case4, case5, case6]

と第2タンク（地下水表面付近）の貯留高（ここでは、初期値からの増加量）に着目した。まず、表-1に示したcase2, case5, case8に相当する修正タンクモデルの各パラメータを用いて順解析を行い求めた貯留高増加量（第1タンク）の経時変化を図-5に、またcase4, case5, case6に相当する修正タンクモデルの各パラメータを用いて順解析を行い求めた貯留高増加量（第1タンク）の経時変化を図-6に示す。これによると、第1タンクの貯留高増加量がピークを示す時間帯は、パラメータの設定如何にかかわらず降雨強度が最も強い時間帯の直後（約4時間後）であり、第1タンクでは降雨強度に対する反応がかなり敏感に表れている。一方、第2タンク（図-7～図-8参照）に着目すると、貯留高増加量がピークを示す時間帯は設定したパラメータによって大きく異なり、第2タンクでは降雨強度に対する反応が第1タンクと比較しかなり鈍い。ここで、土砂災害が発生するタイミングと崩壊形態（①降雨強度が最も強い時間帯に発生するか、その数時間以内に発生する表層崩壊や小規模な深層崩壊、②降雨強度のピークから半日程度以上経過した後に発生する大規模な深層崩壊や地すべり性の崩壊）を加味すると、第

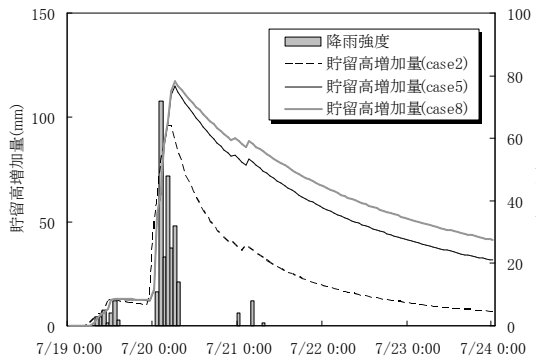


図-5 貯留高増加量（第1タンク）の経時変化 [case2, case5, case8]

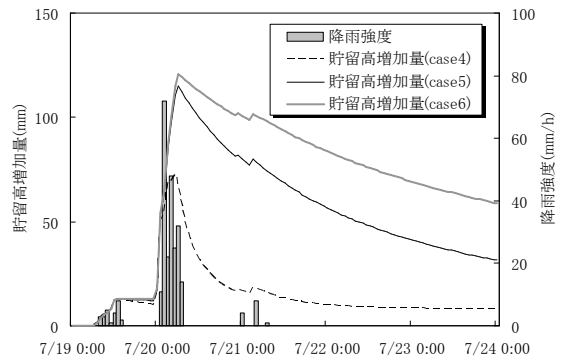


図-6 貯留高増加量（第1タンク）の経時変化 [case4, case5, case6]

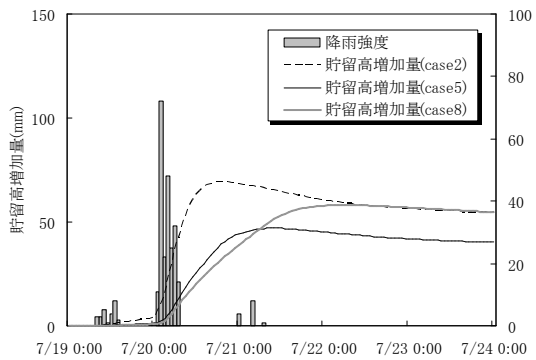


図-7 貯留高増加量（第2タンク）の経時変化 [case2, case5, case8]

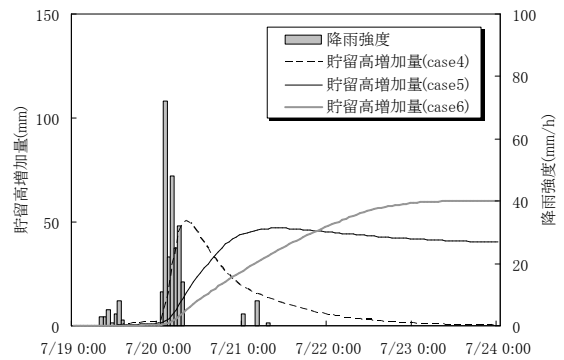


図-8 貯留高増加量（第2タンク）の経時変化 [case4, case5, case6]

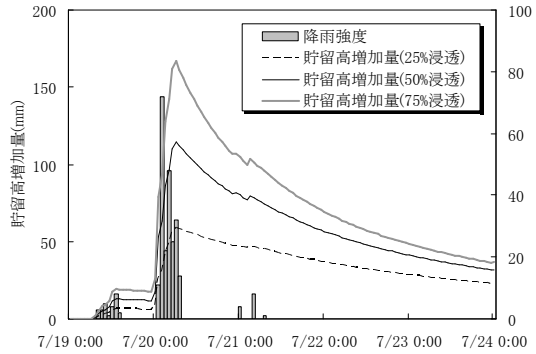


図-9 浸透量を降雨量の25%, 50%, 75%とした場合の貯留高増加量（第1タンク）の経時変化

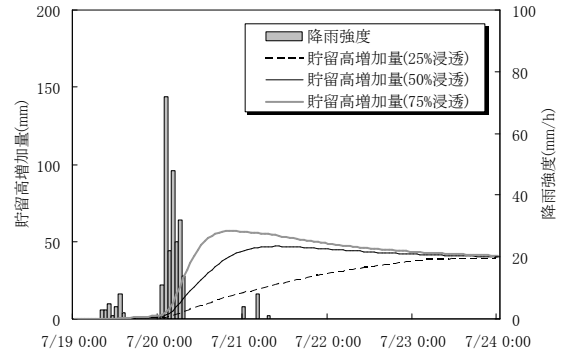


図-10 浸透量を降雨量の25%, 50%, 75%とした場合の貯留高増加量（第2タンク）の経時変化

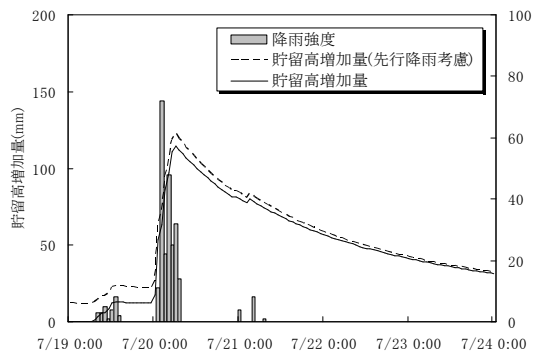


図-11 先行降雨を考慮した場合の貯留高増加量（第1タンク）の経時変化

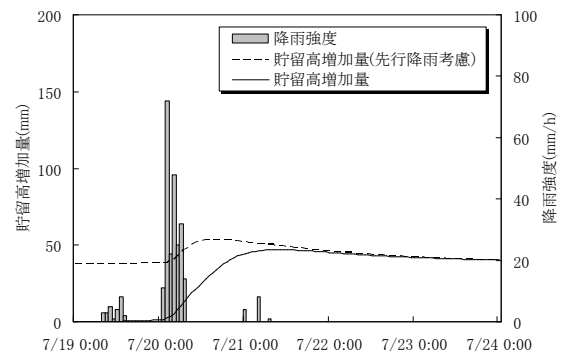


図-12 先行降雨を考慮した場合の貯留高増加量（第2タンク）の経時変化

1タンクは①の危険度予測に、また第2タンクは②の危険度予測に適用できる可能性が認められる。

さて、修正タンクモデルにより土砂災害危険度を予測する場合、地表面での境界条件となる浸透量や先行降雨の影響について議論しなければならない。しかし、浸透量については地質や斜面の傾斜角、さらに降雨強度などによる影響を十分に把握し議論することは現状では困難である。したがって、まず浸透量の影響については、浸透量を種々仮定することにより検討を行った。case5に相当する修正タンクモデルの各パラメータを用いて、便宜的に浸透量を降雨量の25%、50%、75%と仮定し順解析を行い求めた貯留高増加量（第1タンク）の経時変化を図-9に、また貯留高増加量（第2タンク）の経時変化を図-10に示す。これによると、第1タンクの貯留高増加量がピークを示す時間帯は、浸透量の設定如何にかかわらずほぼ同時刻（降雨強度が最も強い時間帯の約4時間後）であるのに対し、第2タンクの貯留高増加量がピークを示す時間帯は、設定した浸透量によって大きく異なる（浸透量が少ないほど、ピークを示す時間帯が遅くなる傾向にある）ことが見て取れる。したがって、修正タンクモデルにより、①表層崩壊や小規模な深層崩壊の発生時刻を予測す

る場合は、浸透量の設定が問題となることはほとんどないが、②大規模な深層崩壊や地すべりの発生時刻を予測する場合には、浸透量の設定に細心の注意を払う必要がある。次に、先行降雨の影響については、水俣市南福寺で観測された2003年6月の降雨量（総降雨量530mm）を考慮することにより検討を行った。case5に相当する修正タンクモデルの各パラメータを用いて、先行降雨を考慮し順解析を行い求めた貯留高増加量（第1タンク）の経時変化を図-11に、また貯留高増加量（第2タンク）の経時変化を図-12に示す。これによると、第1タンクでは先行降雨の影響がほとんど認められないのに対し、第2タンクでは先行降雨の影響が顕著に認められる。したがって、①表層崩壊や小規模な深層崩壊は先行降雨の影響をほとんど受けないが、②大規模な深層崩壊や地すべり性の崩壊は先行降雨の影響を受ける可能性が高いと言える。

次に、修正タンクモデルの土砂災害危険度予測への適用性を検証するため、1972年7月（4日午前0時から7日午前0時まで）に高知県香美市土佐山田町繁藤で観測された雨量データ¹⁰⁾および1999年6月（23日午前0時から7月1日午前0時まで）に広島県呉市宝町で観測された雨量データ⁹⁾を用いて、

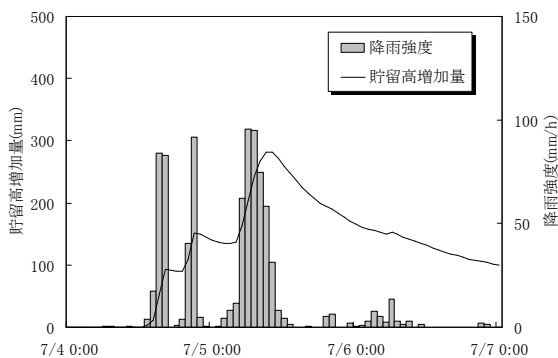


図-13 高知県繁藤における貯留高増加量（第1タンク）の経時変化

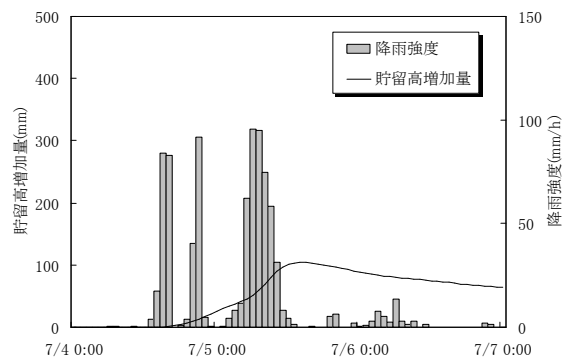


図-14 高知県繁藤における貯留高増加量（第2タンク）の経時変化

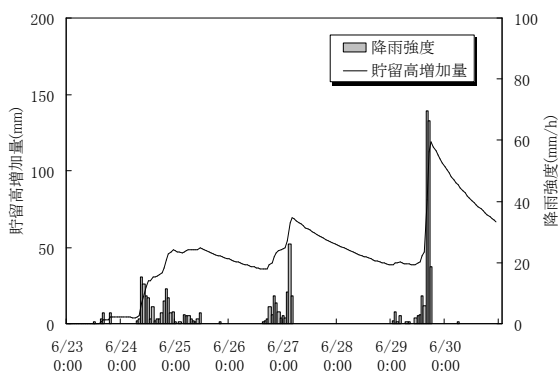


図-15 広島県呉市における貯留高増加量（第1タンク）の経時変化

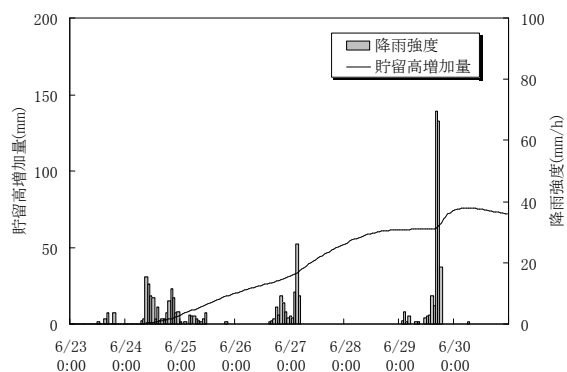


図-16 広島県呉市における貯留高増加量（第2タンク）の経時変化

同様の検討を行った（ただし、修正タンクモデルの流出率を規定する各パラメータは、表-1に示した case5 に相当するパラメータとした）。まず、高知県繁藤における貯留高増加量（第1タンク）の経時変化を図-13に、また貯留高増加量（第2タンク）の経時変化を図-14に示す。これによると、第1タンクの貯留高増加量がピークを示す時間帯は降雨強度が最も強い時間帯の直後（約3時間後）であるのに対し、第2タンクの貯留高増加量がピークを示す時間帯は降雨強度のピークから約6時間後であり、この時間帯は当地区で大規模な山崩れが発生した時間帯¹¹⁾とほぼ一致する。次に、広島県呉市における貯留高増加量（第1タンク）の経時変化を図-15に、また貯留高増加量（第2タンク）の経時変化を図-16に示す。これによると、第1タンクの貯留高増加量がピークを示す時間帯は降雨強度が最も強い時間帯の約2時間後である（この時間帯は、当地区で崖崩れが発生した時間帯¹¹⁾とほぼ一致する）のに対し、第2タンクの貯留高増加量がピークを示す時間帯は降雨強度のピークから約14時間後である。また、先行降雨の影響についてみると、第1タンクでは先行降雨の影響がほとんど認められないのに対し、第2タンクでは先行降雨の影響が顕著に認められる。

以上を踏まえると、修正タンクモデルは、①表層崩壊や小規模な深層崩壊の危険度予測に対する適用性は十分に高いと言える。一方、②大規模な深層崩壊や地すべりの危険度予測に対する適用性は認められるものの、流出率を規定する各パラメータや浸透量の設定に課題が残る。

5. まとめ

本論文では、豪雨時における土砂災害危険度予測への修正タンクモデルの適用性について、解析的に種々の検討を行った。得られた結果を要約すると、以下のとおりである。

- (1) 修正タンクモデルの第1タンクでは、パラメータや浸透量の設定如何にかかわらず、貯留高増加量はほぼ同じ時間帯（降雨強度が最も強い時間帯の直後）にピークを示す。したがって、表層崩壊や小規模な深層崩壊の危険度予測に対する修正タンクモデル（第1タンク）の適用性は十分に高い。
- (2) 修正タンクモデルの第2タンクでは、パラメータや浸透量の設定如何によって、貯留高増加量がピークを示す時間帯は大きく異なる。大規模な深層崩壊や地すべりの危険

度予測に対する修正タンクモデル（第2タンク）の適用性は認められるものの、現状ではパラメータや浸透量の設定に課題が残る。

- (3) 先行降雨が表層崩壊や小規模な深層崩壊に与える影響は小さいが、大規模な深層崩壊や地すべり性の崩壊に与える影響は大きいものと推察される。

今後は、降雨強度のピークからかなりの時間が経過した後に発生する大規模な深層崩壊や地すべりの予測精度向上を目的に、データの蓄積を図り、修正タンクモデルの各パラメータに関する逆問題的考察を行うなど、パラメータや浸透量の設定方法について議論を深める予定である。

参考文献

- 1) 道上正規・檜谷治:タンクモデルによる豪雨時の斜面崩壊予測, 第6回日本自然災害学会学術講演会要旨集, pp.11~12, 1987.
- 2) 岡田憲治:土壌雨量指数, 測候時報, 69-5, pp.67~100, 2001.
- 3) Nakamura, S., Hioki, K., Aoki, K. and Ito, Y.: Groundwater recharge modeling with modified tank model, 第36回国際水文地質学会 (IAH2008 Toyama), 2008. (投稿中)
- 4) 青木一男・日置和昭:地下水かん養のモデル化と推定方法, 地下水技術, 第47巻, 第11号, pp.23~35, 2005.
- 5) 小林慎太郎・丸山利輔:Powellの共役方向法によるタンクモデル定数の探査, 農業土木学会論文集, 第65号, pp.42~47, 1976.
- 6) 永井明博・角谷睦:流出モデル定数の最適化手法, 京大防災研究所年報, 第22号, B2, pp.209~224, 1989.
- 7) Richards, L. A.:Capillary condition of liquid through porous mediums, *Physics*, Vol.1, pp.318~333, 1931.
- 8) van Genuchten, M. Th.: A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soil, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Vol.144, pp.892~898, 1980.
- 9) 気象庁:気象統計情報, <http://www.jma.go.jp/jma/menu/report.html>, 2008.4.1.
- 10) 高知地方気象台:過去の気象災害[昭和47年7月豪雨], <http://www.osaka-jma.go.jp/kochi/koutinokisyousu/kakosaiga/19720704/19720704.htm>, 2008.4.1.
- 11) 社団法人地盤工学会:地盤工学・実務シリーズ 23, 豪雨時における斜面崩壊のメカニズムおよび危険度予測, pp.134~135, 2006.

(2008.5.16 受付)