

奈良県南部地方の豪雨時深層崩壊危険度指標とその活用*

日置 和昭・更谷 慈禧**・鎌塚 康史**・中村 聡司***・小島 央彦****・藤田 琢磨*****

工学部 都市デザイン工学科

(2018年5月31日受理)

Hazard Indicator and Application to Predict Downpour-Induced
Deep-Seated Landslides in Southern Nara

by

Kazuaki HIOKI, Yoshiki SARATANI, Yasufumi KAMATSUKA, Satoshi NAKAMURA,
Teruhiko KOJIMA, Takuma FUJITA,

Department of Civil Engineering and Urban Design,

Faculty of Engineering

Abstract

This study analyzed 10 downpour-induced deep-seated landslides that actually occurred in southern Nara Prefecture (in the villages of Totsukawa, Nosegawa, and Tenkawa, and the former village of Oto in Yoshino, Nara) in 2011 by using the Aoki-Hioki tank model, in which permeability from an upper layer to a lower layer varies depending on storage height. The analysis revealed that the time at which a deep-seated landslide occurred and the time at which the second tank value peaked showed relatively good agreement. Therefore, the authors named this second-tank value the "deep-seated landslide hazard index" and formulated a deep-seated landslide hazard indicator by using that index. This paper describes how the deep-seated landslide hazard indicator applicable to southern Nara Prefecture was developed and reports that monitoring results obtained by using the newly developed indicator are becoming useful information for the local government (Totsukawa, Yoshino, Nara).

キーワード ; 深層崩壊, 深層崩壊危険度指数, 深層崩壊危険度指標, A-Hタンクモデル, 地域連携

Keyword ; Deep-Seated Landslides, Deep-Seated Landslide Hazard Index, Deep-Seated Landslide Hazard Indicator, Aoki-Hioki Tank Model, Regional Partnership

* 地盤工学会誌, Vol. 64, No. 8 (一部掲載(2016年8月1日))

** 十津川村役場, *** 昭和エンジニアリング(株), **** 川崎地質(株), ***** 大阪工業大学大学院

1. はじめに

平成 23 年 (2011 年) の台風 12 号がもたらした記録的な豪雨 (紀伊半島豪雨) により、奈良県南部地方では深層崩壊 (奈良県¹⁾は、崩壊面積 10,000m²以上、推定崩壊深 10m を超える大規模崩壊を深層崩壊と定義した) が多数発生した。この地方の深層崩壊は、主として付加体から成る堆積岩層で構成される斜面で発生したが、その斜面域では、割れ目の少ない岩盤の上位に割れ目の発達した岩盤の存在が確認されており²⁾、表層から浸透した雨水が割れ目の発達した岩盤に貯留され易い条件下にあったと推察される。この地方では、明治 22 年 (1889 年) にも十津川大水害と呼ばれる大規模河川氾濫・土砂災害が発生しており、近年の気象状況 (豪雨災害外力の増大) を鑑みると、この地方に特化した、豪雨時深層崩壊危険度の予測・監視システムの確立・運用が急務と考えられる。

ところで、豪雨時の土砂災害危険度予測手法の 1 つに、地盤中の水分量に着目した水文学的手法がある。この方法は、“降雨がもたらす土砂災害は、地盤中の水分量がある値に達したときに発生する”と考え、その限界貯留量を求めようとするものであり、タンクモデルを活用する方法が広く知られている。タンクモデルは、もともとは降雨の河川流出予測のために開発されたものであるが、降雨量から流出量を差し引けば、地盤中の水分量が求まることから、土砂災害危険度予測にも活用されている。特に、気象庁³⁾では、図-1⁴⁾に示す 3 段直列のタンクモデル (以下、従来タンクモデルと称す) と表-1⁴⁾に示すパラメータ (全国一律) を用いて、土壤雨量指数 (3 つのタンクの貯留高の合計値) を算出している。土壤雨量指数は、地盤中に貯まった雨水量を正確に求めるものではなく、また (地形・地質や植生等の影響を考慮して) 土砂災害危険箇所毎の危険度を予測するものでもない。土壤雨量指数は、地盤中に貯まった雨水の量を 5km 格子毎に、模式的に計算したものであり、5km 格子毎の全体的な土砂災害危険度を予測するものである (すなわち、土壤雨量指数が高くなるということは、5km 格子内に存在する土砂災害危険箇所の危険度が全体的に高くなっていることを意味する)。土壤雨量指数は、先行降雨の影響も考慮されることから、市町村長が住民等への避難勧告・指示等を適時適切に行えるよう、その判断基準として策定された土砂災害警戒避難基準雨量⁵⁾の設定に当たっても、長期降雨の指標として用いられており、土砂災害危険度を測る有効な「ものさし」として活用されている。しかしながら、土壤雨量指数は、比較的表層の地中を対象としているため、平成 23 年に奈良県南部地方で発生したような深層崩壊と関連付けることはできないとされて

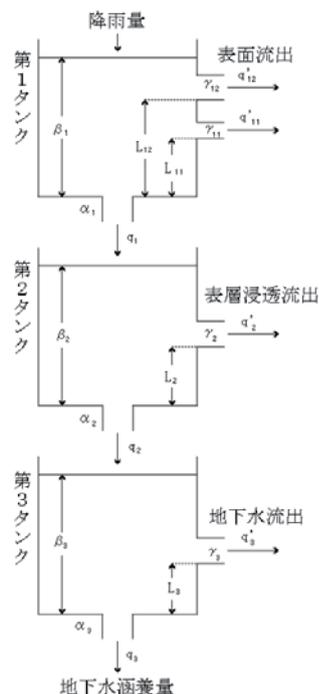


図-1 従来タンクモデルの構造の概念図⁴⁾

表-1 従来タンクモデルのパラメータ一覧⁴⁾

α_1 (hour ⁻¹)	0.12
L_{11} (mm)	15
γ_{11} (hour ⁻¹)	0.10
L_{12} (mm)	60
γ_{12} (hour ⁻¹)	0.15
β_1^0 (mm)	0.000
α_2 (hour ⁻¹)	0.05
L_2 (mm)	15
γ_2 (hour ⁻¹)	0.05
β_2^0 (mm)	0.000
α_3 (hour ⁻¹)	0.01
L_3 (mm)	15
γ_3 (hour ⁻¹)	0.01
β_3^0 (mm)	0.000

いる⁶⁾。

そこで、筆者らは、まず、奈良県南部地方 (奈良県吉野郡十津川村, 同 野迫川村, 同 天川村, 同 旧大塔村) で発生した深層崩壊 10 事例を対象に、従来タンクモデルによる事例分析を行い、深層崩壊と各タンク値 (各タンクの貯留高), とりわけ土壤雨量指数との関連性について検討を行ったが、新たな知見は得られたものの、概ね既往の知見 (深層崩壊と土壤雨量指数を関連付けることはできない)⁶⁾を裏付ける結果であった。

次に、青木ら⁷⁾が提案し、第 1・第 4 筆者ら⁸⁾が改良し

表一2 2011年紀伊半島豪雨による深層崩壊事例

No.	日時	場所	崩壊時の 時間雨量 (mm)	崩壊時の 1週間累積雨量 (mm)
1	2011年 9月 3日 18時30分頃	奈良県吉野郡十津川村野尻(竜神層)	24	930
2	2011年 9月 3日 19時00分頃	奈良県五條市大塔町清水(美山層)	21	1090
3	2011年 9月 3日 20時30分頃	奈良県吉野郡天川村南口裏(花園層)	14	876
4	2011年 9月 4日 2時00分頃	奈良県五條市大塔町辻堂(美山層)	5	1037
5	2011年 9月 4日 2時00分頃	奈良県吉野郡十津川村宇宮原、旭(美山層)	3	1213
6	2011年 9月 4日 3時00分頃	奈良県吉野郡十津川村宇宮原(美山層)	3	1150
7	2011年 9月 4日 7時00分頃	奈良県五條市大塔町宇井(美山層)	3	1048
8	2011年 9月 4日 9時30分頃	奈良県吉野郡天川村坪内(花園層)	0	1037
9	2011年 9月 4日 10時00分頃	奈良県吉野郡野迫川村北股(美山層)	3	866
10	2011年 9月 4日 12時00分頃	奈良県吉野郡天川村坪内(花園層)	0	1057

た Aoki-Hioki タンクモデル (以下、A-H タンクモデルと称す) を活用して、同様の事例分析を行い、深層崩壊と各タンク値との関連性について検討を行ったところ、深層崩壊の発生時刻と第2 タンク値がピークを迎える時刻が比較的良く一致したため、この第2 タンク値を“深層崩壊危険度指数”と呼び、同指数を用いた深層崩壊危険度指標の作成を試みた。

本論文では、奈良県南部地方(奈良県吉野郡十津川村, 同 野迫川村, 同 天川村, 同 旧大塔村)を対象とした、深層崩壊危険度指標の作成・提案過程を取り纏めるとともに、同指標の活用事例について報告する。なお、第1筆者ら^{9),10)}は、これまでに『想定外』豪雨による地盤災害への対応を考える調査研究委員会」などでの活動を通じて、紀伊山地全域を対象とした、豪雨時深層崩壊の危険度指標について検討を行ってきた。本論文では、対象地域を奈良県南部地方(奈良県吉野郡十津川村, 同 野迫川村, 同 天川村, 同 旧大塔村)に限定することで、危険度指標の精度向上を図った。

2. 深層崩壊と土壌雨量指数との関連性

平成23年の記録的な豪雨(紀伊半島豪雨)による深層崩壊の事例分析を以下の手順で実施した。まず、奈良県南部地方(奈良県吉野郡十津川村, 同 野迫川村, 同 天川村, 同 旧大塔村)で発生した深層崩壊事例(発生日時が明確であるもの)を10事例ピックアップし、深層崩壊発生現場付近のレーダー・アメダス解析雨量を取得した。次に、従来タンクモデルを活用して、深層崩壊10事例の分析を行い、深層崩壊と各タンク値(各タンクの貯留高)、とりわけ土壌雨量指数との関連性について検討を行った。

奈良県南部地方で発生した深層崩壊10事例を表一2に示し、それらの概略位置図を図一2に示す。紀伊半島豪雨による深層崩壊は、美山層¹¹⁾(美山付加コンプレック



図一2 深層崩壊事例の概略位置図

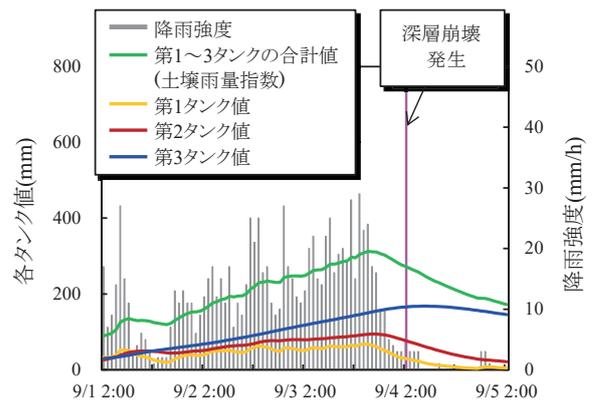
ス¹²⁾ や花園層¹¹⁾(花園付加コンプレックス¹²⁾)に集中しており、分析の対象とした深層崩壊10事例の内訳は、美山層:6事例, 花園層:3事例, 竜神層¹¹⁾(竜神付加コンプレックス¹²⁾):1事例となっている。表一2より、深層崩壊発生現場付近の1週間累積雨量は概ね800~1,200mmとなっており、“1週間累積雨量:800mm”が深層崩壊危険度予測・監視の1つの指標となり得ることを確認できる。

事例分析に用いたパラメーター一覧を表一3⁴⁾に示す。従来タンクモデルのパラメータは地質の違いにより5種類あり、事例分析は5種類全てのパラメータを用いて実施した。なお、表一3に示すパラメータCが、現在、気象庁が土壌雨量指数を算出する際に、全国一律に採用しているパラメータである(表一1参照)。解析結果の一例(表一2に示した深層崩壊事例No.4, パラメータC)を図一

表一3 深層崩壊の事例分析に用いたパラメータ一覧 (従来タンクモデル)

	パラメータA (筑後川 小平)	パラメータB (馬洗川 南畑敷)	パラメータC (木津川 月ヶ瀬)	パラメータD (長良川 美濃)	パラメータE (夕張川 清幌橋)
$\alpha_1(\text{hour}^{-1})$	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12
$L_{11}(\text{mm})$	40	30	15	30	15
$\gamma_{11}(\text{hour}^{-1})$	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
$L_{12}(\text{mm})$	75	60	60	75	40
$\gamma_{12}(\text{hour}^{-1})$	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
$\beta_1^0(\text{mm})$	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$\alpha_2(\text{hour}^{-1})$	0.08	0.08	0.05	0.04	0.04
$L_2(\text{mm})$	15	15	15	5	5
$\gamma_2(\text{hour}^{-1})$	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
$\beta_2^0(\text{mm})$	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$\alpha_3(\text{hour}^{-1})$	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
$L_3(\text{mm})$	15	15	15	15	15
$\gamma_3(\text{hour}^{-1})$	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
$\beta_3^0(\text{mm})$	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

3に示す。これによると、深層崩壊の発生時刻と土壤雨量指数がピークを迎える時刻は一致せず(9時間の差がある)、両者の関連性はほとんど認められない。第1タンク値や第2タンク値(深層崩壊の発生時刻と第2タンク値のピーク時刻が一致するとの知見¹³⁾もある)についても同様のことが言え、その関連性は認められない。しかし、第3タンク値については、その値がピークを迎える時刻と深層崩壊の発生時刻が比較的良く一致しているようにも見て取れる。ここで、各タンク値がピークを迎える時刻と深層崩壊発生時刻の差(深層崩壊10事例の平均値)を取り纏めたものが表一4である。これによると、何れのパラメータを用いても、解析結果にほとんど差異が生じない(パラメータが解析結果に与える影響は小さい)ことを確認できる。従って、以降は、パラメータCの結果についてのみ考察する。土壤雨量指数は深層崩壊が発生する約7時間前(最大差:24時間,変動係数 v :42%)にピークを迎えており、既往の知見(深層崩壊と土壤雨量指数を関連付けることはできない⁶⁾)を裏付ける結果となった。次に、各タンク値に着目すると、第1タンク値は深層崩壊発生時の約9時間前(最大差:29時間,変動係数 v :48%)に、第2タンク値は深層崩壊発生時の約6時間前(最大差:23時間,変動係数 v :40%)に、第3タンク値は深層崩壊が発生した約7時間後(最大差:21時間,変動係数 v :23%)にピークを迎えており、深層崩壊の発生時刻と各タンク値がピークを迎える時刻も一致せず、深層崩壊と各タンク値との関連性はやはり見出せない。ただし、第2タンク値と第3タンク値の合計値に着目す



図一3 解析結果の一例(崩壊事例No.4,パラメータC)

ると、その値がピークを迎える時刻と深層崩壊の発生時刻との差はかなり小さくなり、両者の差は10事例の平均で約2時間(最大差:15時間,変動係数 v :29%)に収まることを付記しておく。

3. 深層崩壊危険度指標の提案

(1) A-Hタンクモデルの構造とパラメータ

A-Hタンクモデルの構造の概念図を図一4⁸⁾に示す。A-Hタンクモデルとは、各タンクの貯留高を地盤の体積含水率、上段から下段への浸透率を地盤の不飽和透水係数とみなし、浸透率(不飽和透水係数)が貯留高(体積含水率)の変動に伴って変化する(すなわち、貯留高が高くなるに従い浸透率は増大し、貯留高が低くなるに従

表—4 従来タンクモデルの各タンク値がピークを迎える時刻と深層崩壊発生時刻の差（ピーク時刻-崩壊時刻）

	第1～3タンク値の合計値 (土壌雨量指数)		第1タンク値		第2タンク値		第3タンク値	
パラメータA	最 大 :	9時間	最 大 :	8時間	最 大 :	9時間	最 大 :	20時間
	最 小 :	-24時間	最 小 :	-29時間	最 小 :	-24時間	最 小 :	-8時間
	平 均 :	-6.5時間	平 均 :	-8.9時間	平 均 :	-6.2時間	平 均 :	6.4時間
	変 動 係 数 :	42%	変 動 係 数 :	48%	変 動 係 数 :	41%	変 動 係 数 :	23%
パラメータB	最 大 :	9時間	最 大 :	8時間	最 大 :	9時間	最 大 :	20時間
	最 小 :	-24時間	最 小 :	-29時間	最 小 :	-24時間	最 小 :	-9時間
	平 均 :	-6.7時間	平 均 :	-8.9時間	平 均 :	-6.2時間	平 均 :	5.7時間
	変 動 係 数 :	42%	変 動 係 数 :	48%	変 動 係 数 :	41%	変 動 係 数 :	24%
パラメータC	最 大 :	9時間	最 大 :	8時間	最 大 :	10時間	最 大 :	21時間
	最 小 :	-24時間	最 小 :	-29時間	最 小 :	-23時間	最 小 :	-7時間
	平 均 :	-6.7時間	平 均 :	-8.9時間	平 均 :	-5.9時間	平 均 :	7.2時間
	変 動 係 数 :	42%	変 動 係 数 :	48%	変 動 係 数 :	40%	変 動 係 数 :	23%
パラメータD	最 大 :	9時間	最 大 :	8時間	最 大 :	10時間	最 大 :	23時間
	最 小 :	-24時間	最 小 :	-29時間	最 小 :	-22時間	最 小 :	-7時間
	平 均 :	-6.7時間	平 均 :	-8.9時間	平 均 :	-5.1時間	平 均 :	8.5時間
	変 動 係 数 :	42%	変 動 係 数 :	48%	変 動 係 数 :	36%	変 動 係 数 :	22%
パラメータE	最 大 :	9時間	最 大 :	8時間	最 大 :	10時間	最 大 :	22時間
	最 小 :	-24時間	最 小 :	-29時間	最 小 :	-22時間	最 小 :	-7時間
	平 均 :	-6.7時間	平 均 :	-8.9時間	平 均 :	-5.2時間	平 均 :	7.6時間
	変 動 係 数 :	42%	変 動 係 数 :	48%	変 動 係 数 :	36%	変 動 係 数 :	23%

い浸透率は減少する) 修正タンクモデル⁷⁾を改良 (各パラメータの感度分析結果に基づいて、感度が小さく不要と思われるパラメータを削除) したもので、各タンクの浸透率 α_n^t が前時間ステップにおける貯留高 β_n^{t-1} の関数で表される。関数形としては、簡単のため 1 次式を仮定すると、各タンクの浸透率は、式(1)～(2)のように表すことができる。

$$\alpha_n^t = 0 \quad (0 \leq \beta_n^{t-1} \leq a_{n1}) \quad (1)$$

$$\alpha_n^t = a_{n3} \times (\beta_n^{t-1} - a_{n1}) \quad (a_{n1} \leq \beta_n^{t-1}) \quad (2)$$

ただし、式(2)において $\alpha_n^t \geq 1$ となる場合は、 $\alpha_n^t = 1$ とする。ここに、 α_n^t : 浸透率、 β_n^{t-1} : 前時間ステップにおける貯留高、 a_{n1} 、 a_{n3} : 定数、 t : 時間ステップ (=60min)、 n : タンクの番号である。

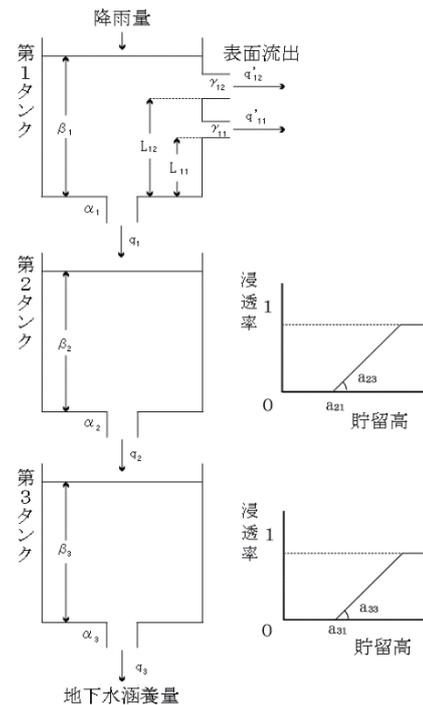
また、各タンクの貯留高および各タンクからの浸透量は、式(3)～(4)によって表すことができる。

$$\beta_n^t = \beta_n^{t-1} - q_n^{t-1} + q_{n-1}^{t-1} \quad (3)$$

$$q_n^t = \alpha_n^t \times \beta_n^t \quad (4)$$

ここに、 q_n^t : 各時間ステップにおける浸透量、 β_n^t : 各時間ステップにおける貯留高である。

図—4 に示した第2タンクと第3タンクが A-H タンク



図—4 A-H タンクモデルの構造の概念図⁸⁾

モデルである。なお、本研究では、第1タンクの貯留高と表面流出量については、気象庁が土壌雨量指数を算出する際の従来タンクモデルと同様、式(5)～(6)によって表すこととした。

$$\beta_1^t = \beta_1^{t-1} - q_1^{t-1} - q'_{11}{}^{t-1} - q'_{12}{}^{t-1} + R^t \quad (5)$$

$$q'_{1m}{}^t = (\beta_1^t - L_{1m}) \times \gamma_{1m} \quad (6)$$

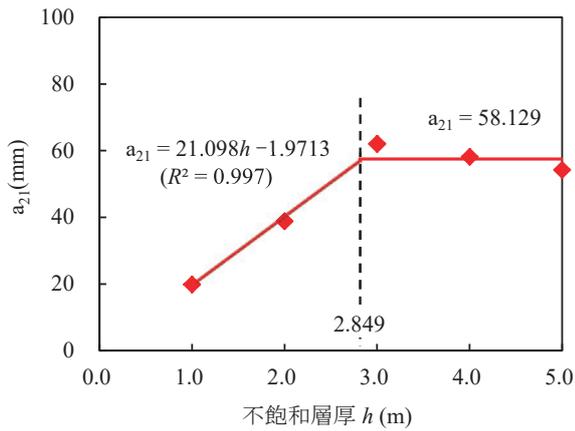
ここに、 $q'_{1m}{}^t$ ：各時間ステップにおける表面流出量、 R^t ：各時間ステップにおける降雨量、 γ_{1m} ：表面流出率、 L_{1m} ：流出孔の高さ、 m ：流出孔の番号である。

なお、A-H タンクモデルの各パラメータは、対象地域の不飽和層厚 h や不飽和浸透特性を考慮して設定することができ、第1・第4著者ら⁸⁾は、花崗岩風化砂質土（まさ土）の不飽和浸透特性（吸水走査曲線）から^{14),15)}、 $k_s = 4.2 \times 10^{-5} \text{m/s}$ 、 $\alpha = 0.0876 \text{cm}^{-1}$ 、 $n = 2.388$ 、 $\theta_s = 0.298$ 、 $\theta_r = 0.134$ と設定し、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とA-H タンクモデルにより求めた地下水涵養量との残差二乗和が最小となるパラメータを同定することにより、A-H タンクモデルの各パ

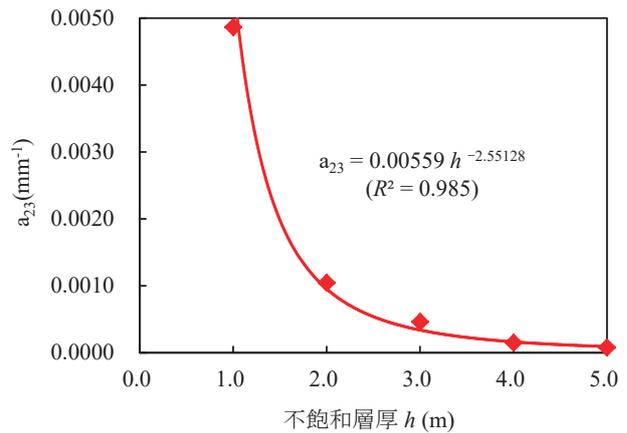
ラメータ (a_{21} , a_{23} , a_{31} , a_{33}) と不飽和層厚 h との関係を図-5⁸⁾のように求めている（詳細は、参考文献8を参照されたい）。

(2) 深層崩壊の事例分析

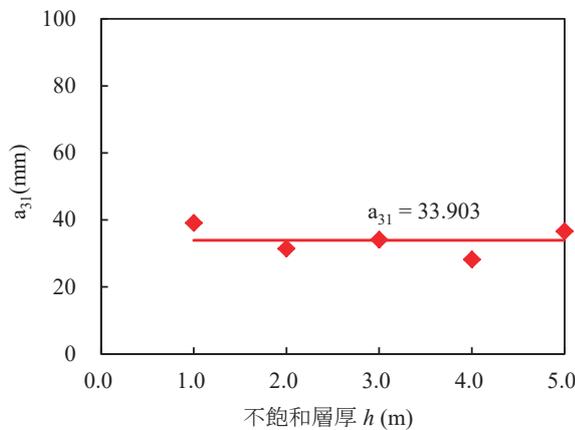
事例分析は、従来タンクモデルと同様、奈良県南部地方で発生した深層崩壊10事例を対象とした。事例分析に用いたパラメータ一覧を表-5に示す。A-H タンクモデル（第2タンクと第3タンク）のパラメータは不飽和層厚の違いにより任意に設定できるが（図-5参照）、ここでは、便宜上、不飽和層厚を1m, 2m, 3m, 4m, 5mとした場合のパラメータを用いた（ただし、筆者らが、深層崩壊発生現場の実際の不飽和層厚をこのように考えているわけではない）。また、第1タンクについては、従来タンクモデルと同様のパラメータを用いた。解析結果の一例（表-2に示した深層崩壊事例No.4, パラメータ⑤）を図-6に示す。これによると、深層崩壊の発生時刻と3つのタンクの貯留高の合計値がピークを迎える時刻はか



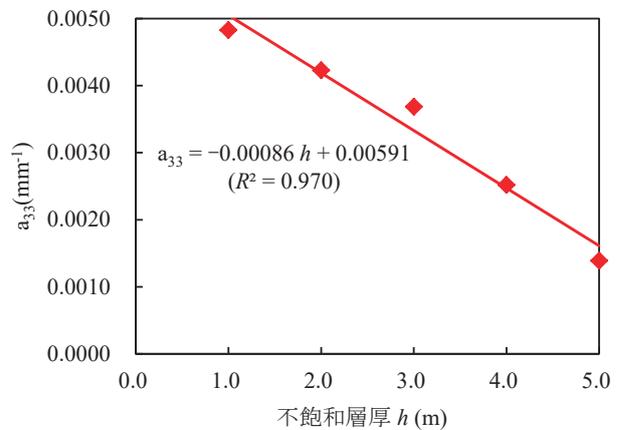
(a) a_{21}



(b) a_{23}



(c) a_{31}



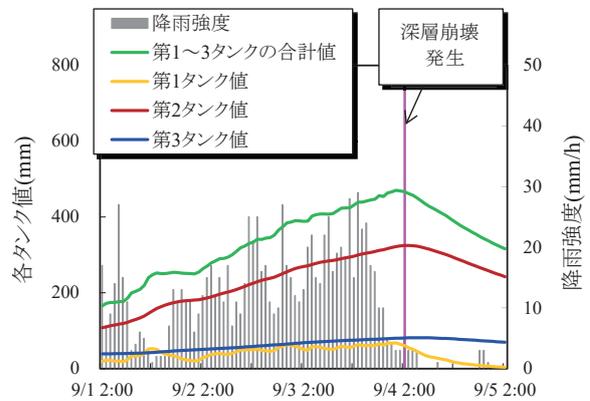
(d) a_{33}

図-5 A-H タンクモデルの各パラメータと不飽和層厚 h との関係⁸⁾

表一五 深層崩壊の事例分析に用いたパラメータ一覧 (A-H タンクモデル)

	パラメータ①	パラメータ②	パラメータ③	パラメータ④	パラメータ⑤
$\alpha_1(\text{hour}^{-1})$	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12
$L_{11}(\text{mm})$	15	15	15	15	15
$\gamma_{11}(\text{hour}^{-1})$	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
$L_{12}(\text{mm})$	60	60	60	60	60
$\gamma_{12}(\text{hour}^{-1})$	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
$\beta_1^0(\text{mm})$	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$a_{21}(\text{mm})$	19.127	40.225	58.129	58.129	58.129
$a_{23}(\text{mm}^{-1})$	0.00559	0.00095	0.00034	0.00016	0.00009
$\beta_2^0(\text{mm})$	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$a_{31}(\text{mm})$	33.903	33.903	33.903	33.903	33.903
$a_{33}(\text{mm}^{-1})$	0.00505	0.00419	0.00333	0.00247	0.00161
$\beta_3^0(\text{mm})$	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

なり一致しており、両者の関連性が示唆される。また、第2タンク値についても同様のことが言え、その関連性が示唆される。ここで、各タンク値がピークを迎える時刻と深層崩壊発生時刻の差（深層崩壊10事例の平均値）を取り纏めたものが表一六である。これによると、表一五に示すパラメータ⑤を用いた場合、3つのタンクの貯留高の合計値に着目すると、その値がピークを迎える時刻と深層崩壊発生時刻との差は約3時間（最大差：15時間、変動係数 v ：23%）であることを確認でき、第2タンク値に至っては、ピークを迎える時刻と深層崩壊発生時刻との差がほぼ0時間（最大差：11時間、変動係数 v ：21%）



図一六 解析結果の一例（崩壊事例No.4, パラメータ⑤）

表一六 A-H タンクモデルの各タンク値がピークを迎える時刻と深層崩壊発生時刻の差（ピーク時刻-崩壊時刻）

	第1～3タンク値の合計値		第1タンク値		第2タンク値 (深層崩壊危険度指数)		第3タンク値	
パラメータ①	最大：	8時間	最大：	8時間	最大：	9時間	最大：	9時間
	最小：	-15時間	最小：	-29時間	最小：	-15時間	最小：	-14時間
	平均：	-3.8時間	平均：	-8.9時間	平均：	-3.6時間	平均：	-2.6時間
	変動係数：	27%	変動係数：	48%	変動係数：	27%	変動係数：	25%
パラメータ②	最大：	9時間	最大：	8時間	最大：	9時間	最大：	10時間
	最小：	-15時間	最小：	-29時間	最小：	-14時間	最小：	-14時間
	平均：	-3.3時間	平均：	-8.9時間	平均：	-2.1時間	平均：	-1.3時間
	変動係数：	26%	変動係数：	48%	変動係数：	24%	変動係数：	23%
パラメータ③	最大：	9時間	最大：	8時間	最大：	9時間	最大：	10時間
	最小：	-15時間	最小：	-29時間	最小：	-14時間	最小：	-12時間
	平均：	-3.1時間	平均：	-8.9時間	平均：	-1.8時間	平均：	-0.3時間
	変動係数：	25%	変動係数：	48%	変動係数：	24%	変動係数：	22%
パラメータ④	最大：	9時間	最大：	8時間	最大：	10時間	最大：	12時間
	最小：	-15時間	最小：	-29時間	最小：	-12時間	最小：	-11時間
	平均：	-2.7時間	平均：	-8.9時間	平均：	-1.0時間	平均：	0.9時間
	変動係数：	24%	変動係数：	48%	変動係数：	23%	変動係数：	22%
パラメータ⑤	最大：	9時間	最大：	8時間	最大：	11時間	最大：	12時間
	最小：	-15時間	最小：	-29時間	最小：	-11時間	最小：	-7時間
	平均：	-2.6時間	平均：	-8.9時間	平均：	0.3時間	平均：	2.7時間
	変動係数：	23%	変動係数：	48%	変動係数：	21%	変動係数：	20%

であることを確認できる。第1筆者¹⁶⁾は、この第2タンク値に焦点を当て、第2タンク値がピークを迎える時刻と深層崩壊発生時刻との差が0時間（最大差：12時間、変動係数 v ：21%）となるパラメータ（便宜上、不飽和層厚を4.8mとした場合）を見出し、表一7のように提案している。本論文では、以降、表一7に示したパラメータを用いた場合の第2タンク値を“深層崩壊危険度指数”と呼ぶことにする。

ここで、深層崩壊危険度指数を利用するに当たっての留意点を以下に纏めておく。

- 深層崩壊危険度指数は、奈良県南部地方（奈良県吉野郡十津川村、同 野迫川村、同 天川村、同 旧大塔村）における豪雨時深層崩壊危険度の予測・監視を目的とした指数であり、仮想的な計算値である。
- 深層崩壊危険度指数は、奈良県南部地方で一律のパラメータを用いて算出している。
- 深層崩壊危険度指数が高くなるということは、その地域（比較的広範囲）に存在する斜面の危険度が全体的に高まっていることを意味する。すなわち、深層崩壊危険度指数は、個々の斜面の危険度を予測・監視するものではない。

（3）深層崩壊危険度指数の物理的意味

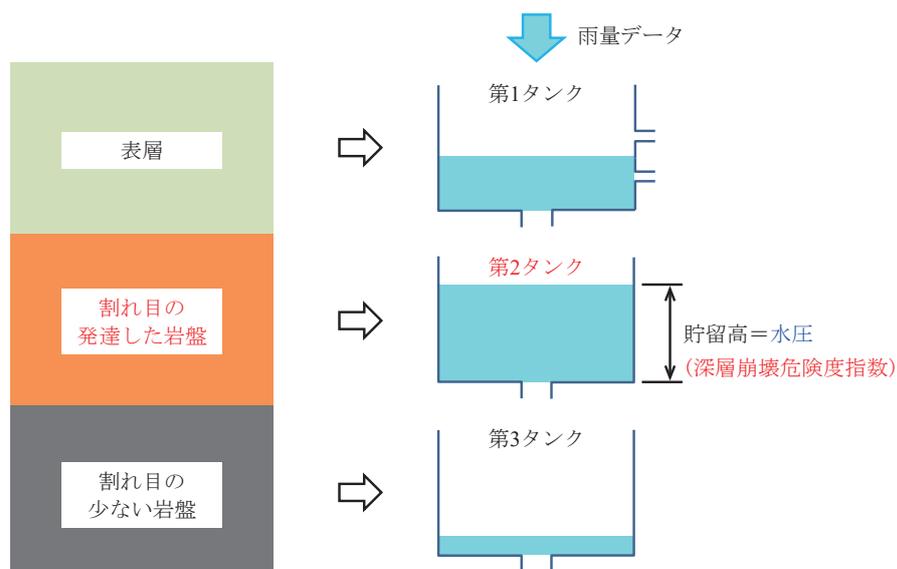
ここでは、深層崩壊危険度指数の物理的意味について考えてみる。平成23年の記録的な豪雨により深層崩壊が発生した奈良県南部地方の斜面では、割れ目の少ない岩盤の上位に割れ目の発達した岩盤の存在が確認されており²⁾、表層から浸透した雨水が割れ目の発達した岩盤に貯

留され易い条件下にあったと推察される。岩盤の割れ目内に雨水が多く貯留されると、岩盤内の水圧が大きくなり、それが斜面の安定性に悪影響を与え、やがて深層崩壊を誘発する。筆者らは、深層崩壊10事例の分析結果を踏まえて、A-Hタンクモデルでは、図一7¹⁰⁾に示すように、第1タンクを表層、第2タンクを割れ目の発達した岩盤、第3タンクを割れ目の少ない岩盤とイメージすることにした。すなわち、第2タンク値（深層崩壊危険度指数）が高くなるということは、割れ目の発達した岩盤に作用する水圧が増大するということであり、これは深層崩壊危険度が高くなることを意味すると考えた。

A-Hタンクモデルによる解析結果の一例（深層崩壊事例No.4、表一7に示したパラメータ）を図一8に示す。同図より、第3タンク（割れ目の少ない岩

表一7 深層崩壊危険度指数の算出に用いるパラメータ¹⁶⁾

α_1	0.12
$L_{11}(\text{mm})$	15
γ_{11}	0.10
$L_{12}(\text{mm})$	60
γ_{12}	0.15
$\beta_1^0(\text{mm})$	0.000
$a_{21}(\text{mm})$	58.129
$a_{23}(\text{mm}^{-1})$	0.00010
$\beta_2^0(\text{mm})$	0.000
$a_{31}(\text{mm})$	33.903
$a_{33}(\text{mm}^{-1})$	0.00178
$\beta_3^0(\text{mm})$	0.000



図一7 A-Hタンクモデルによる深層崩壊危険度予測の概念¹⁰⁾

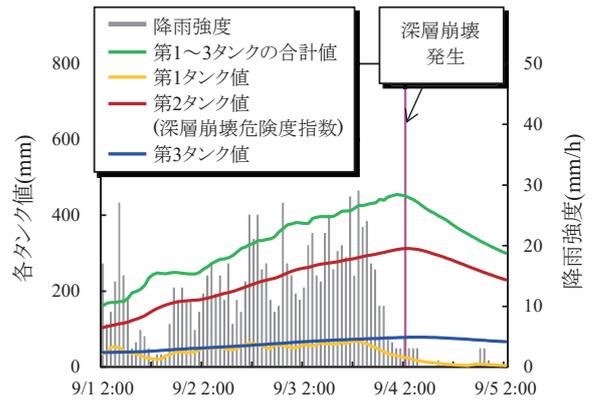
盤)では貯留高の変動が小さいのに対し、第2タンク(雨水が貯留されやすい条件下にある割れ目の発達した岩盤)では貯留高の変動が大きくなっており、筆者らは、A-Hタンクモデルによる解析結果は、深層崩壊発生現場の水理現象と傾向が類似するものと考えた。

(4) 深層崩壊危険度指標の作成

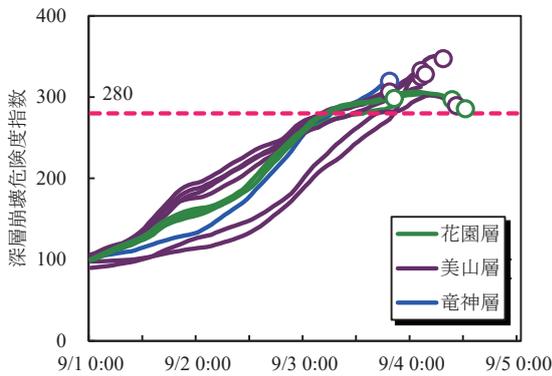
「土石流」や「集中的に発生するがけ崩れ」を対象とした、土砂災害警戒避難基準雨量⁹⁾の設定に当たっては、短期降雨指標として60分間積算雨量、長期降雨指標として土壤雨量指数が用いられている。深層崩壊の発生には多量の降雨と、それが岩盤の比較的深層部まで達し貯まるまでの時間を要するため、深層崩壊危険度指標の作成に当たっては、短期降雨指標として深層崩壊危険度指数、長期降雨指標として深層崩壊危険度指数の1週間累積値を採用した。

表一7に示したパラメータを用いて、深層崩壊10事例の分析を行い、深層崩壊危険度指数の経時変化を示したのが図一9であり、また深層崩壊危険度指

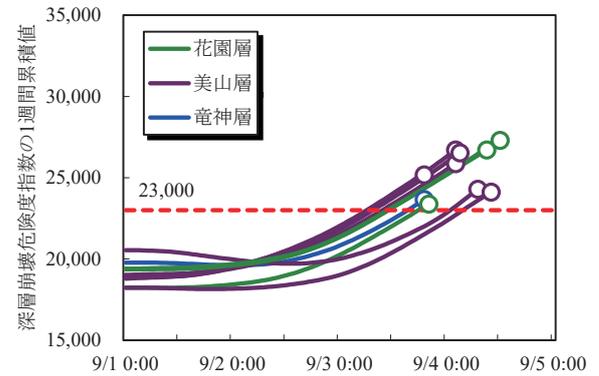
数の1週間累積値の経時変化を示したのが図一10である。これによると、奈良県南部地方の深層崩壊は、深層崩壊危険度指数が280を超えた後に、また深層崩壊危険度指数の1週間累積値が23,000を超えた後に発生していることが見て取れる。ここで、深層崩壊が発生したときの深層崩壊危険度指数の平均値は311(最大:347, 最小:286, 変動係数:6%),



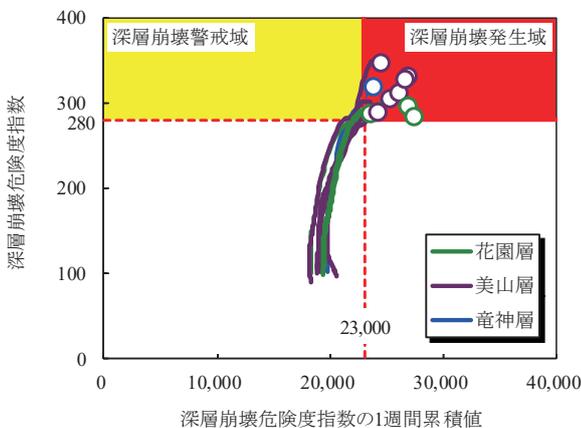
図一8 解析結果の一例(崩壊事例No.4, 表一7)



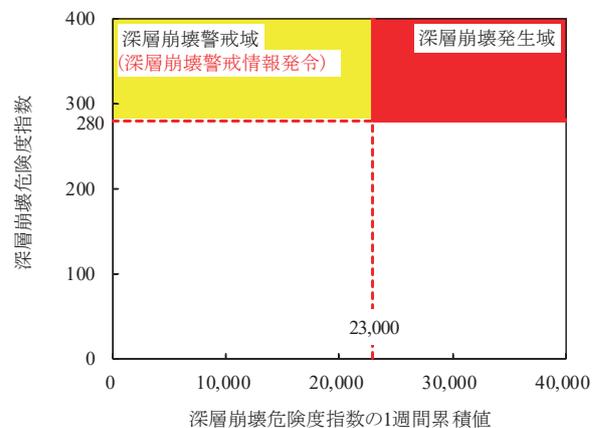
図一9 深層崩壊危険度指数の経時変化



図一10 深層崩壊危険度指数の1週間累積値の経時変化



図一11 深層崩壊危険度指数とその1週間累積値の関係



図一12 奈良県南部地方の豪雨時深層崩壊危険度指標

また深層崩壊危険度指数の1週間累積値の平均値は25,374(最大:27,292, 最小:23,382, 変動係数:5%)となっており, 奈良県南部地方(美山層, 花園層, 竜神層)で一律のパラメータを用いているにもかかわらず, 両者ともに, ばらつきはかなり小さいものとなっている. ここで, 深層崩壊発生時の深層崩壊危険度指数とその1週間累積値の関係を求めたものが図一11である. これによると, 深層崩壊は10事例ともに, 「深層崩壊危険度指数:280以上」かつ「深層崩壊危険度指数の1週間累積値:23,000以上」の領域で発生していることを確認でき, この領域を奈良県南部地方の深層崩壊発生域(レッドゾーン)と設定する. また, 同図より, 深層崩壊10事例ともに, 1週間累積値が23,000に到達する前に, 深層崩壊危険度指数が先行して280に達していることを確認でき, この段階(深層崩壊危険度指数が280を超えた段階)で深層崩壊に対して警戒を強める必要がある. 従って, 「深層崩壊危険度指数:280以上」かつ「深層崩壊危険度指数の1週間累積値:23,000未満」を深層崩壊警戒域(イエローゾーン)として図一12のように設定し, 深層崩壊発生域と併せて, これを奈良県南部地方(奈良県吉野郡十津川村, 同野迫川村, 同天川村, 同旧大塔村)の豪雨時深層崩壊危険度指標とした. ここで, 深層崩壊10事例について, 警戒域(イエローゾーン)に到達してから崩壊に至るまでの時間を表一8に示す. これによると, 警戒域に到達してから崩壊に至るまでの時間は平均18時間(最大:27時間, 最小:5時間, 変動係数:43%)であることを確認できる. すなわち, 警戒域に達してから崩壊に至るまでには平均で18時間(最低でも5時間)の猶予があり, 警戒域への到達情報(深層崩壊警戒情報)は, 地域住民の避難タイミングを計る上で, 有効な情報になるものと考えられる. なお, 現在, 十津川村役場は, この深層崩壊警戒情報を住民等への避難指示を行う際の判断資料の一つとして有効に活用している.

4. 深層崩壊を誘発する降雨の特徴

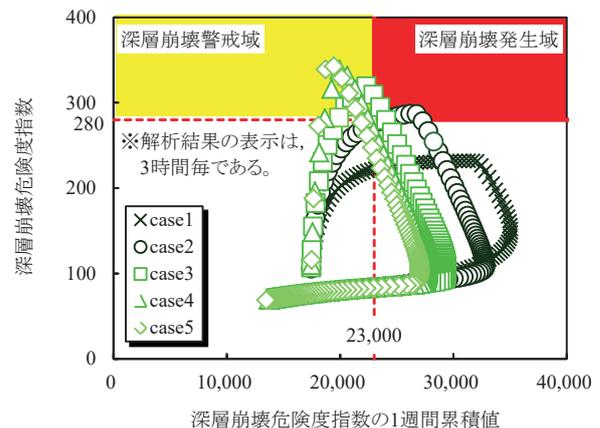
奈良県南部地方の深層崩壊に対して特に警戒が必要となる降雨の特徴を調べるため, 表一9に示す降雨条件下で, A-Hタンクモデルによる数値実験を行った. 数値実験は, 先行降雨として0.50mm/h×600h(表一2に示した深層崩壊10事例の平均値は, 0.55mm/h×600hであった)を与えた後, 5ケースについて実施したが, 何れのケース

表一8 深層崩壊警戒域に達してから崩壊に至るまでの時間

事例No.	警戒域に達してから崩壊に至るまでの時間(hour)
No.1(竜神層)	13
No.2(美山層)	14
No.3(花園層)	5
No.4(美山層)	15
No.5(美山層)	22
No.6(美山層)	21
No.7(美山層)	10
No.8(花園層)	27
No.9(美山層)	17
No.10(花園層)	31
平均 17.5 (変動係数 v :43%)	

表一9 数値実験を行った降雨パターン

	降雨強度(mm/h)	継続時間(hour)	浸透量(mm)	表面流出量(mm)
case1	6.25	144	620 (69%)	280 (31%)
case2	12.50	72	550 (61%)	350 (39%)
case3	25.00	36	438 (49%)	462 (51%)
case4	50.00	18	384 (43%)	516 (57%)
case5	100.00	9	358 (40%)	542 (60%)



図一13 数値実験結果

も総降雨量(=降雨強度×継続時間)は900mmとした(表一2に示した深層崩壊10事例の72時間累積雨量の平均値は, 13.2mm/h×72h≒950mmであった). なお, 表一9には第2タンクへの浸透量(= q_1)と表面流出量(= $q'_{11} + q'_{12}$)を示しているが, これは第1タンクにより算出し

たものである。これによると、降雨強度はさほど大きくはないが、継続時間が長い降雨に対して、浸透量は多くなる傾向にあることを確認できる。

図一12に示した深層崩壊危険度指標に数値実験結果をプロットしたものが図一13である。まず、深層崩壊危険度指数に着目すると、そのピーク値は、case1 : 232, case2 : 288, case3 : 319, case4 : 339, case5 : 345 となっており、深層崩壊危険度指数は継続時間よりも降雨強度の影響を受けるものと考えられる。次に、深層崩壊危険度指数の1週間累積値に着目すると、そのピーク値は、case1 : 35,063, case2 : 32,826, case3 : 29,408, case4 : 27,770, case5 : 27,026 となっており、1週間累積値は降雨強度よりも継続時間の影響を受けるものと考えられる。これらを念頭に、深層崩壊危険度に着目すると、深層崩壊発生域への滞在時間は、case1 : 0時間, case2 : 19時間, case3 : 5時間, case4 : 0時間, case5 : 0時間となっており、奈良県南部地方の深層崩壊危険度は10~30mm/h程度の降雨が長時間継続する場合に、特に警戒を要するものと考えられる。

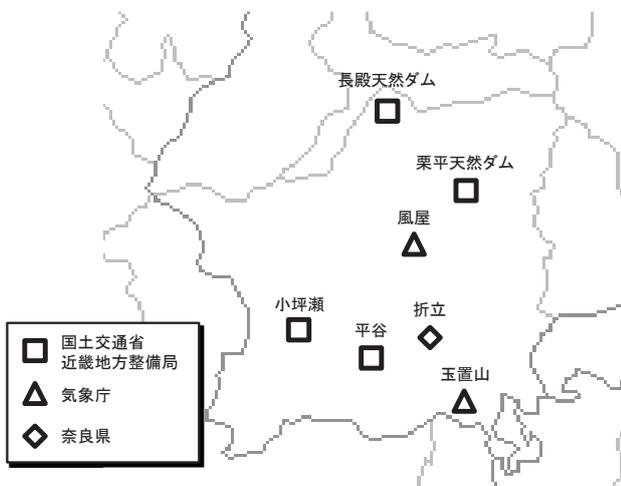
5. 深層崩壊危険度指標の活用

奈良県吉野郡十津川村は、平成23年の紀伊半島豪雨により甚大な被害を受けた。特に、深層崩壊は十津川村内だけでも30箇所で見られ、これは奈良県下における発生数の約55%に相当する。これ以降、十津川村は災害から立ち直り、魅力ある村づくりを推進するため、今後100年を見据えた復興計画を掲げて諸活動に取り組んでいる。また、大阪工業大学

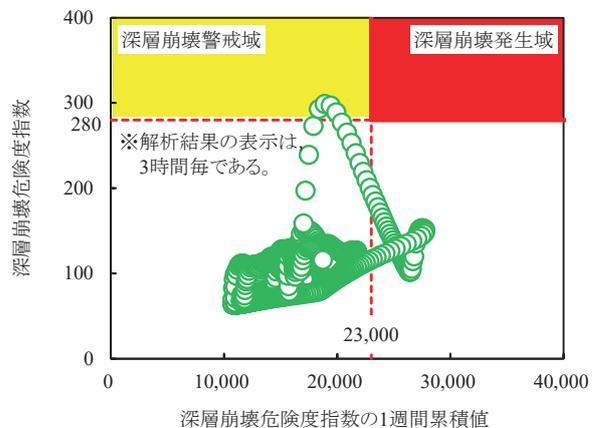
は知的・人的資源を活用した地域連携を推進しており、同村と同大学は平成26年12月に連携協定を締結した。これを受けて、同大学都市デザイン工学科の地盤防災研究室は平成24年度から継続実施している「豪雨時深層崩壊危険度の監視活動」の一層強化を進めている¹⁷⁾。

平成27年度は、図一14に示す7箇所を対象に、本研究で作成した深層崩壊危険度指標(図一12参照)を活用して、深層崩壊危険度の監視を行った。監視結果の一例(栗平天然ダム)を図一15¹⁸⁾に示す。台風11号襲来時、栗平天然ダムでは1週間累積雨量が800mmに迫り、深層崩壊危険度は警戒域(イエローゾーン)に到達したが、発生域(レッドゾーン)には達しておらず、深層崩壊も発生しなかった(ただし、警戒域への到達前後に栗平天然ダムの一部が崩壊したとの情報を得ている)。なお、危険度が深層崩壊警戒域に到達したタイミングで十津川村役場に緊急連絡(深層崩壊警戒情報)を入れており、監視体制が機能していることを村と大学の双方で確認した。

同研究室は、平成27年度には十津川村村内の3箇所(旭、五百瀬、出谷)に独自の雨量計を設置した(写真一1参照)。設置箇所は、十津川村役場と協議の上、地層、深層崩壊発生状況、降雨量観測状況、住居数、借地条件、電波状況等を鑑み決定したが、これらの雨量計設置により、同村内の監視体制は図一16¹⁷⁾のように強化された。平成28年9月現在、同研究室は解析の自動化に成功しており、上記3箇所(旭、五百瀬、出谷)に関しては、雨量データに加え解析結果(危険度指標に深層崩壊危険度指数とその1週間累積値がプロットされたもの)が、60分毎に村と大学の双方に送信されている(平成30年6月からは、NHK奈良放送局にも送信されている)。



図一14 十津川村の降雨量観測地(～平成27年度)



図一15 深層崩壊危険度の監視結果 (2015年4月～10月、栗平天然ダム)¹⁸⁾



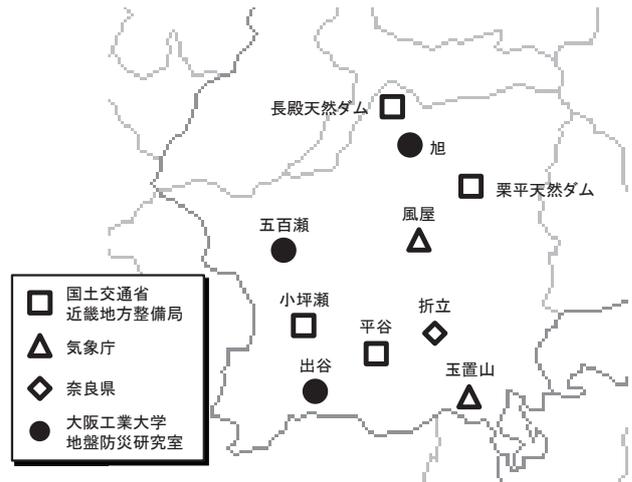
写真一 大阪工業大学（地盤防災研究室）が独自に設置した雨量計（十津川村出谷）

現在、十津川村役場では、土砂災害警戒情報と深層崩壊警戒情報の違いを理解した上で、住民等への避難勧告・指示等を行う際の資料として、両者（土砂災害警戒情報と深層崩壊警戒情報）を積極的に活用しており、特に、深層崩壊警戒情報は、住民等への避難指示を行う際の判断資料の一つとして役立っている。

6. まとめ

本論文では、A-Hタンクモデルを活用して、平成23年に奈良県南部地方（奈良県吉野郡十津川村、同野迫川村、同天川村、同旧大塔村）で発生した深層崩壊10事例の分析を行い、同地方の豪雨時深層崩壊危険度指標を作成するとともに、同指標の活用事例を報告した。得られた成果を要約すると、以下のとおりである。

- (1) 平成23年に奈良県南部地方で発生した深層崩壊とA-Hタンクモデルによる解析値（各タンク値）との関連性について検討を行ったところ、深層崩壊の発生時刻と第2タンク値がピークを迎える時刻が比較的良く一致したため、この第2タンク値を“深層崩壊危険度指数”と呼び、同指数を短期降雨指標、同指数の1週間累積値を長期降雨指標とした深層崩壊危険度指標を作成するとともに、深層崩壊警戒域（イエローゾーン）への到達情報（深層崩壊警戒情報）が地域住民の避難タイミングを計る上で、有効な情報になり得ることを確認した。
- (2) 作成した深層崩壊危険度指標による監視結果が、地方自治体（奈良県吉野郡十津川村）にとって有効な情報



図一 16 十津川村の降雨量観測地（平成28年度～）¹⁷⁾

となりつつあることを報告した。

- (3) 同地方の深層崩壊は、10～30mm/h程度の降雨が長時間継続し、1週間累積雨量が800mmを超えるような場合に、特に警戒が必要となることを指摘した。
- (4) 平成23年に奈良県南部地方で発生した深層崩壊と土壌雨量指数との関連性について検討を行ったところ、深層崩壊の発生時刻と土壌雨量指数がピークを迎える時刻はほとんど一致せず、両者の関連性は認められないことを確認した。

大阪工業大学の地盤防災研究室は、今後も十津川村を中心とした奈良県南部地方の豪雨時深層崩壊危険度を継続して監視する予定であり、この監視活動が奈良県南部地方の防災・減災力強化に少しでも役立てば幸いである。
謝辞 本研究の遂行に当たっては、(一社)近畿建設協会の研究助成を受けた。また、十津川村内への雨量計の設置には、同協会の他に、(株)常翔ウェルフェア、昭和エンジニアリング(株)、川崎地質(株)の支援を受けた。さらに、大阪市立大学大学院の三田村宗樹教授には深層崩壊発生現場の水理現象について議論の場を提供頂き、また神戸大学都市安全研究センターの大石 哲教授には深層崩壊発生現場の解析雨量を取得・提供頂いた。ここに、深く感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 奈良県:平成23年紀伊半島大水害 大規模土砂災害に関する調査・研究報告, p3, 2015.
- 2) 地盤工学会関西支部, 日本地質学会, 日本応用地質学会, 関西地質調査業協会:平成23年度台風12号による紀伊半島における地盤災害調査報告書,

- pp.14-19, 2011.
- 3) 岡田憲治:土壌雨量指数, 測候時報, 69-5 pp.67-100, 2002.
 - 4) Ishihara Y. and Kobatake S. : Runoff model for flood forecasting, Bull. Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ. Vol.29, pp.27-43, 1979.
 - 5) 国土交通省河川局砂防部, 気象庁予報部, 国土交通省国土技術政策総合研究所: 国土交通省河川局砂防部と気象庁予報部の連携による土砂災害警戒避難基準雨量の設定手法(案), 2005.
 - 6) 気象庁予報部予報課 気象防災推進室: 降雨情報を活用した災害発生危険度予測技術(土砂災害), 予報業務許可事業者を対象に実施した講習会資料, 2013.
 - 7) 青木一男, 福田護, 今西肇, 飯田智之, 西瀬和之: 地下水の鉛直かん養量および安定供給量の推定, 第4回水資源に関するシンポジウム前刷集, pp.287-290, 1992.
 - 8) 日置和昭, 中村聡司, 杉本和規: 修正タンクモデルの改良とパラメータの設定, 地盤の環境・計測技術に関するシンポジウム2011論文集, pp.89-94, 2011.
 - 9) 日置和昭, 中村聡司: 紀伊山地の豪雨時大規模崩壊に関する水文学的指標について, *Kansai Geo-Symposium* 2013論文集, pp.107-112, 2013.
 - 10) 日置和昭, 中村聡司, 大石 哲, 平井孝治, 三田村宗樹: 紀伊山地の豪雨時深層崩壊に関する水文学的指標とその物理的意味, *Kansai Geo-Symposium* 2014論文集, pp.163-168, 2014.
 - 11) 日本地質学会: 日本地方地質誌, 近畿地方, pp.145-149, 2009.
 - 12) 紀州四万十団体研究会: 紀伊半島における四万十付加体研究の新展開, 地学団体研究会, 専報59, p.295, 2012.
 - 13) 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.
 - 14) 中村聡司, 日置和昭, 長谷川昌弘, 青木一男: 砂質土の不飽和浸透パラメータに関する実験的研究, 土木学会第63回年次学術講演会講演概要集, pp.733-734, 2008.
 - 15) 日置和昭, 中村聡司: 土の吸水走査曲線に関する実験的考察, 第12回地盤改良シンポジウム論文集, pp.131-136, 2016.
 - 16) 日置和昭: 奈良県十津川村の豪雨時深層崩壊危険度予測に関する水文学的研究, 近畿建設協会研究助成報告書, 2016.
 - 17) 日置和昭, 小林泰三, 後誠介, 岡島賢治, 小泉圭吾, 泉並良二: 講座 平成23年紀伊半島大水害の実態と教訓(6.紀伊半島大水害以降の防災・減災の取り組み), 地盤工学会誌, pp.69-75, 2016.
 - 18) 井上貴照, 柏井孝太, 福井亮太, 松本光真: 奈良県南部地方における豪雨時深層崩壊危険度の予測・監視, 大阪工業大学 工学部 都市デザイン工学科卒業論文(地盤防災研究室), 2015.

