

# 修正I-D法による斜面崩壊危険度予測の精度向上に向けた 一連の降雨イベントの設定に関する検討

Consideration of Setting up a Series of Rainfall Events to Improvement of Hazard Prediction Accuracy on Slope Failure by Modified I-D Method

檀上徹<sup>1</sup>・酒匂一成<sup>2</sup>・藤本将光<sup>3</sup>・石澤友浩<sup>4</sup>・伊藤真一<sup>5</sup>・深川良一<sup>6</sup>

Toru Danjo, Kazunari Sako, Masamitsu Fujimoto, Tomohiro Ishizawa, Shinichi Ito  
and Ryoichi Fukagawa

<sup>1</sup>国立研究開発法人防砂科学技術研究所 特別研究員 (〒305-0006 茨城県つくば市天王台3-1)

Associated Research Fellow, National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

<sup>2</sup>鹿児島大学教授 学術研究院理工学域工学系 (〒890-0065 鹿児島県鹿児島市郡元1-21-40)

Professor, Dept. of Research Field in Engineering, Science and Engineering Area, Kagoshima University

<sup>3</sup>立命館大学准教授 理工学部環境都市工学科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

Associate Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Ritsumeikan University

<sup>4</sup>国立研究開発法人防砂科学技術研究所 主任研究員 (〒305-0006 茨城県つくば市天王台3-1)

Chief Researcher, National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

<sup>5</sup>鹿児島大学助教 学術研究院理工学域工学系 (〒890-0065 鹿児島県鹿児島市郡元1-21-40)

Assistant Professor, Dept. of Research Field in Engineering, Science and Engineering Area, Kagoshima University

<sup>6</sup>立命館大学特命教授 理工学部 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

Professor, College of Science and Engineering, Ritsumeikan University

A prediction method of rainfall-induced slope failure using a Modified I-D Method is employed, and the accuracy of the prediction method is analyzed in the paper. The Modified I-D Method is one of rainfall indexes, and the rainfall duration and its average rainfall intensity are used as the rainfall index. These rainfall indexes are influenced by the definition of the series of rainfall. The optimum duration of the series of rainfall to obtain a prediction result of high precision is discussed in this paper.

**Keywords:** Slope failure, Rainfall, Duration, Monitoring

## 1. はじめに

京都に点在する神社仏閣等の文化遺産の多くは、山腹・山麓に位置しており、斜面崩壊の危険性が潜在的に高い場合が多い。これらの文化財は代替性がなく、現在の社会・経済状況を考慮すると、被災後に文化財の修復を行うことは容易でないことが予想される。また、観光客が多く訪れることから、斜面崩壊が発生すると多くの観光客の人命が失われる可能性が高いことは明らかである。そのため、斜面崩壊の危険度を予測することは非常に重要な課題であると考えられる。

斜面崩壊の危険度予測として、雨量指標を用いた手法が数多く提案されてきた。例えば、気象庁で運用されている横軸に土壌雨量指数<sup>1)</sup>と縦軸に1時間雨量を用いた指標や、建設省時代に提案された横軸に半減期72時間実効雨量と縦軸に半減期1.5時間実効雨量を用いた指標等が挙げられる。雨量指標は、降雨がどれくら

い土中に貯留されているかを示す指標であり、斜面ごとの貯留される特性（地質や土質条件）の違いを表現するためには、パラメータの設定を行う必要がある。

一方で、Caine<sup>2)</sup>は、深さ2~3 m以下の72件の斜面崩壊の結果より、横軸に降雨開始から斜面崩壊までの継続時間  $t_i$  と縦軸にその間の平均降雨強度  $\bar{R}_i$  ( $\Sigma R_{t_i}/t_i$ ) を用いた指標（以後、I-D (Intensity-Duration) 法と呼ぶ。）との間には、累乗関係があることを示した。なお、ここで示す平均降雨強度とは、降雨開始から任意の時間までの時間雨量の平均値のことである。また、Saito et al.<sup>3)</sup>は、降雨に伴う1174件（2006~2008年）の日本の斜面崩壊をI-D法により分析した結果、Caineと同様の関係が得られることを示した。しかしながら、I-D法の指標としての継続時間や平均降雨強度には、地盤の特性は含まれていない。

そこで、筆者ら<sup>4)</sup>は、Caineの提案するI-D法に、清水寺におけるM地点1.0 m深さのテンシオメータによる現地計測結果を加味することで斜面崩壊の危険度予測精度を向上させることを目的とした修正I-D法を提案した。一連の降雨イベントを無降雨時間が12時間でリセットすると定義し分析した結果、修正I-D法が既往の雨量指標（土壌雨量指数と1時間雨量を組み合わせた指標、半減期72時間実効雨量と半減期1.5時間実効雨量を組み合わせた指標、累積雨量と時間雨量を組み合わせた指標、累積雨量と最大12時間雨量を組み合わせた指標、I-D法）と比べ、斜面崩壊の有無の適中数が最も高いことを示した。ここで、I-D法と修正I-D法との大きな違いは、分析を開始する時点が異なる点である（図-1）。I-D法は、降雨開始時点から分析した方法であり、修正I-D法は、一連の降雨イベント（無降雨時間12時間でリセット）で最初に飽和帯が形成されてからの継続時間とその間の平均降雨強度を分析した方法である。なお、分析方法の詳細については2章で述べる。

一方で筆者らは、修正I-D法を用いる課題<sup>4)</sup>として、①分析で用いるセンサの設置位置について②任意の地点における降雨量に基づく  $t_{sat}$  の基準値の設定方法について③一連の降雨イベントの定義について④既往の崩壊データを用いた斜面崩壊のクリティカルライン（以後、CLと呼ぶ。）の設定について、を挙げている。本論文では③の課題に着目し検討することとした。

修正I-D法で取り扱う一連の降雨イベントは、降雨開始から無降雨時間が12時間継続するまでとし、12時間無降雨が継続すると時間と累積雨量がリセットされると定義して分析している。これは、自治体やJR等<sup>5)</sup>の累積雨量の定義を参考としているが、この時間の取り方によって分析結果が異なることが想定される。そのため、修正I-D法を用いて斜面崩壊の予測を行うには、一連の降雨イベントを定義するための無降雨時間の最適な時間設定が必要となる。そこで本研究では、修正I-D法を用いる上で、一連の降雨イベントを定義するための無降雨時間の設定について検討する。

## 2. 修正I-D法について

修正I-D法とは、最初に飽和帯が形成されてからの継続時間とその間の平均降雨強度を雨量指標として、過去の崩壊履歴から、対象斜面の降雨による斜面崩壊のCLを設定する手法である。図-1より、一連の降雨イベントで最初に飽和帯が形成された時点  $t_0$ 、任意の時点  $t_i$  までの期間 ( $t_i - t_0$ ) を“継続時間”と呼ぶこととする。

次に、本推定手法における  $t_0$  について説明する。テンシオメータにより最初に水理水頭が 0.0 cmH<sub>2</sub>O 以上が計測された時点  $t_{sat}$  とする。一方で、水理水頭が負から正に転じた正確な時点は、 $t_{sat}$  時点から計測ステップ  $\Delta t_m$  分遡った時点 ( $t_0$ ) との間に存在する。よって  $t_{sat}$  時には、水理水頭が負から正に転じた正確な時点から少なからず時間が経過している可能性が考えられる。そのため、 $t_{sat}$  時に水理水頭 > 0.0 cmH<sub>2</sub>O の場合には、 $t_0 = t_{sat} - \Delta t_m$  として、 $t_{sat}$  時に水理水頭 = 0.0 cmH<sub>2</sub>O の場合には、 $t_0 = t_{sat}$  としている。また、

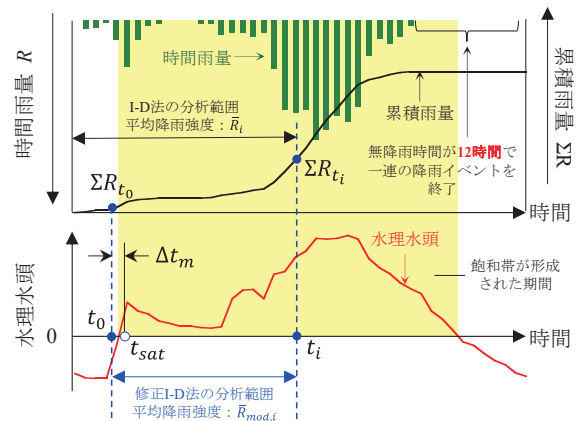


図-1 I-D法と修正I-D法の分析方法の模式図

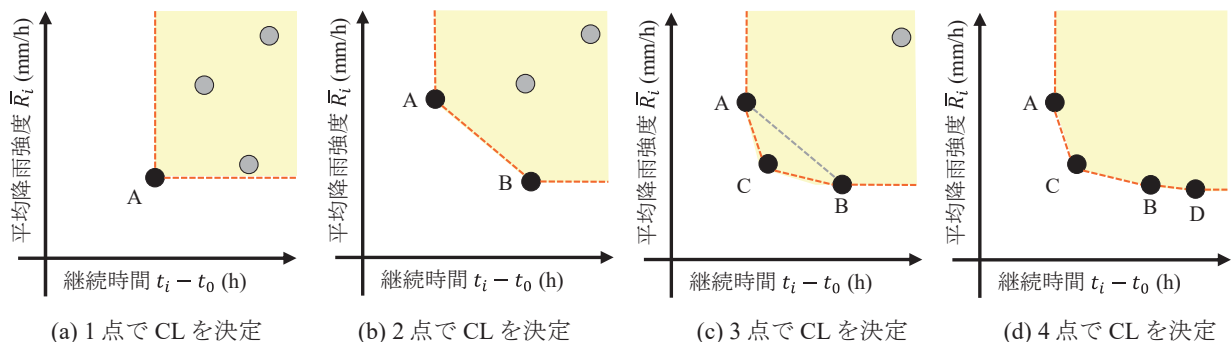


図-2 本分析で実施した降雨時の斜面崩壊のCLの設定方法

本論文で示す“平均降雨強度”は、継続時間における平均降雨強度  $\bar{R}_{mod,i}$  であり、図-1 に示すように一連の降雨イベントの降り始めを「0」とした場合、平均降雨強度  $\bar{R}_{mod,i}$  は次式で表わされる。

$$\bar{R}_{mod,i} = (\sum R_{t_i} - \sum R_{t_0}) / (t_i - t_0) \quad (1)$$

ここで、 $R_{t_i}$  は任意の時点の時間雨量、 $\sum R_{t_i}$  は降雨開始から  $t_i$  時点までの累積雨量、 $\sum R_{t_0}$  は降雨開始から  $t_0$  時点までの累積雨量である。

$t_{sat}$  は、テンシオメータ等を用いた計測から得られるが、テンシオメータ等を用いて永久的に計測し続けることは、計測を維持するための費用や労力を考慮すると現実的ではない。また、修正 I-D 法を用いた斜面崩壊の危険度予測を行うための CL の設定のためには、過去の崩壊履歴の分析が必要となるが、その崩壊発生時が計測期間外であるケースが多く、雨量データしか観測値がないため、 $t_{sat}$  を計測結果から求めることが困難である。そのため、ある期間の計測データを用いて  $t_{sat}$  を推定することができれば、これらの課題は解決できると考える。そこで、著者らは、修正 I-D 法を清水寺境内斜面に適用するため、M 地点 1.0 m 深さのテンシオメータによる計測結果（2004 年 8 月～2005 年 1 月）<sup>6,7</sup> から 1 時間雨量が 4.0 mm 以上、累積雨量が 7.0 mm 以上の条件で水理水頭が 0.0 cmH<sub>2</sub>O 以上になるとの推定結果<sup>8</sup>を用いて、修正 I-D 法を用いた斜面崩壊の危険度予測の精度検証<sup>4</sup>を行ってきた。実用性を考慮すると、短期間のテンシオメータ等の計測結果から  $t_{sat}$  の基準値を設定し、降雨量のみで判断する方法が良いと筆者らは考えている。

図-2 に斜面崩壊発生の有無を判断するための CL の設定方法を示す。まず、継続時間 (X 指標) および平均降雨強度 (Y 指標) の最小値の崩壊時のプロットを抽出する。X 指標および Y 指標の最小値のプロットが 1 点の場合 (図-2 (a)参照)、そのプロットを基準に X 軸、Y 軸に平行に線を延長した。X 指標および Y 指標の最小値のプロットが 2 点ある場合 (図-2 (b)参照)、2 点間を直線で結び、そこから X 軸、Y 軸に平行に線を延長した。(b) の場合かつ最小値のプロットの 2 点間の直線より X 指標または Y 指標が小さいプロットが存在した場合 (図-2 (c)参照)、3 点を直線で結ぶことで CL の設定を行うこととした。また、4 点を直線で結ぶ場合についても同様である (図-2 (d)参照)。

### 3. 一連の降雨イベントの設定の検討

#### (1) 計測斜面および計測機器の概要

本研究では、京都市東山区に位置する清水寺境内の奥之院後背斜面を対象とした。これまで本斜面では、図-3に示した位置にテンシオメータおよび雨量計を設置し計測を実施してきた<sup>9</sup>。本斜面の選定に当たり酒匂ら<sup>9</sup>は、(社)日本道路協会発行「道路工のり面工・斜面安定工指針」<sup>10</sup>の「安定度調査表(落石・崩壊)」を参考に、境内の重要文化財周辺斜面に絞り、斜面の安定度調査を実施した。その結果、本斜面の危険度が相対的に高いことがわかったことから、計測対象斜面として選定した。図-4に計測対象斜面の地質断面図および計測位置を示す。本斜面の平均勾配は約40度であり、周辺斜面も同様な勾配を有していることが確認できている。テンシオメータを用いた計測は、B、M、C地点で実施したが、M地点は遷急点であること、すべり面の勾配が同じであればすべり土塊が大きいほど安定度は下がることから、多地点と比べ比較的危険性が高いと判断し、M地点を対象とした。既往の崩壊時(1972年7月、1999年6月)のすべり面の深さが

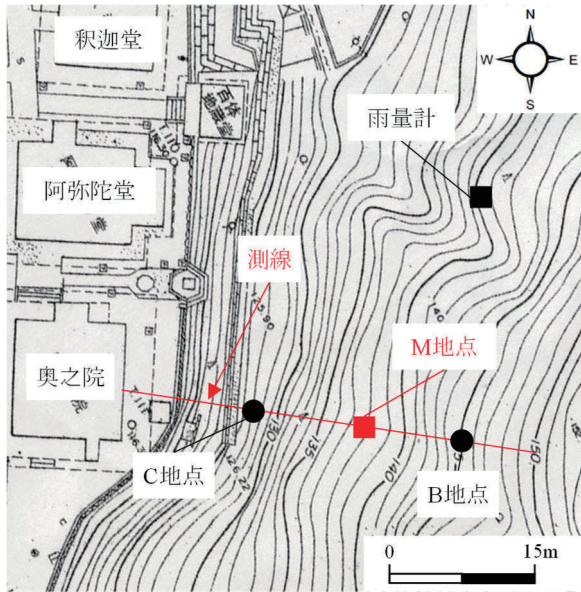


図-3 計測機器の設置位置

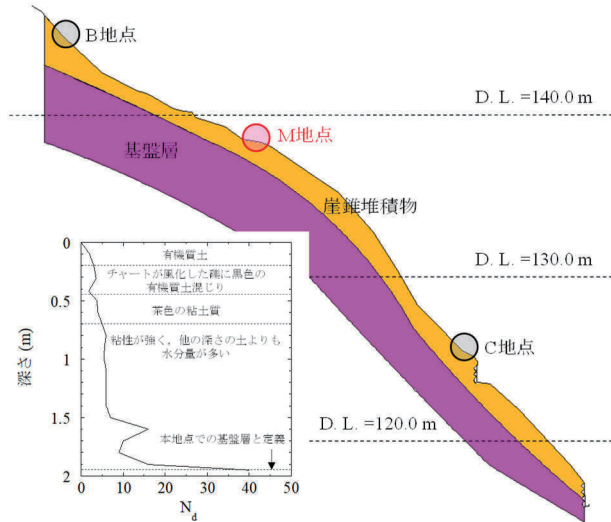


図-4 断面図および計測位置 (参考文献 5)に加筆・修正)

1 m程度であったことから、本研究では2004年7月からM地点の0.2~1.0 m深さにテンシオメータを設置し、地盤内の水分状態の変化の把握を行ってきた。

本斜面の地層は丹波層群に含まれ、基岩は頁岩、砂岩、チャートで構成されている。図-4にM地点における簡易動的コーン貫入試験の結果を示す。地盤調査による観察の結果<sup>9)</sup>、表層から深さ0.2 mまでは、有機質土であった。深さ0.4~0.5 m付近は、チャートが風化した礫に有機質が混じっており、深さ0.45 m付近で土の色が変化している。深さ0.45 m以浅は、黒色で有機質土だが、0.45 m以深は、茶色の粘土質の土が現れた。また、0.7 mを境にして土の色が濃くなっていった。深さ0.7 m以深の土は粘性が強く、水分量も他の深さの土よりも多くなっていた。

本研究で使用したテンシオメータは、計測部の負圧センサ、先端部のポーラスカップ、これらを繋ぐパイプ（アクリルまたは塩化ビニル製）で構成されており、パイプ内には脱気水を充填している。使用したテンシオメータの負圧センサとしては、2004~2011年は、PA7-102V（日本電産コパル電子株式会社）、2013年以降は、PA-850-102V-NGF（日本電産コパル電子株式会社）を使用した。なお、事前にキャリブレーションを行い、正圧部の計測が可能であることを確認している他、Masaoka et al.<sup>11)</sup>による現地計測結果からも計測可能であることが示されている。テンシオメータは、1カ月に1度を目安にメンテナンスを行い、定期的にセンサ交換や脱気水の補充を行った。降雨量計測には転倒マス式雨量計を用い、2004~2005年は1転倒0.5 mm、2007~2011年は1転倒0.2 mm、2013年以降は1転倒0.01 inch（約0.256 mm）の転倒マス式雨量計を使用した。計測データは、M地点でデータロガーに10分間隔で収録した。なお、2004

表-1 1930年以降の累積雨量150 mm以上の降雨イベント（12時間無降雨でリセット）

No.	年月日	累積雨量 <sup>*</sup> (mm)	計測場所	斜面崩壊の有無
1	1930.6.25	171.2	気象庁 京都	無
2	1932.7.1	163.2	気象庁 京都	無
3	1935.6.29	369.6	気象庁 京都	無
4	1938.7.5	266.4	気象庁 京都	無
5	1941.6.28	224.9	気象庁 京都	無
6	1953.6.5	215.0	気象庁 京都	無
7	1957.6.27	202.8	気象庁 京都	無
8	1959.8.12	316.5	気象庁 京都	無
9	1960.8.10	245.6	気象庁 京都	無
10	1960.8.29	187.3	気象庁 京都	無
11	1961.6.23	409.0	気象庁 京都	無
12	1965.9.16	219.2	気象庁 京都	無
13	1967.7.9	269.7	気象庁 京都	無
14	1968.8.17	172.0	気象庁 京都	無
15	1971.9.6	247.5	気象庁 京都	無
16	1972.7.12	220.5 <sup>**</sup>	気象庁 京都	有
17	1972.9.16	164.0	気象庁 京都	無
18	1983.9.28	360.0	気象庁 京都	無
19	1986.7.22	209.0	気象庁 京都	無
20	1987.7.14	153.5	気象庁 京都	無
21	1997.8.4	175.0	気象庁 京都	無
22	1999.6.27	127.0 <sup>**</sup>	気象庁 京都	有
23	1999.6.29	211.0	気象庁 京都	無
24	2010.7.14	233.5	気象庁 京都	無
25	2013.9.16	292.4 <sup>**</sup>	清水寺	有
26	2014.8.10	243.6	清水寺	無
27	2015.7.16	234.7 <sup>**</sup>	清水寺	有
28	2017.10.21	152.5	気象庁 京都	無
29	2018.7.4	335.0	気象庁 京都	無
30	2020.7.6	197.0	気象庁 京都	無

<sup>\*</sup>12時間無降雨でリセット

<sup>\*\*</sup>崩壊までの最大

2004

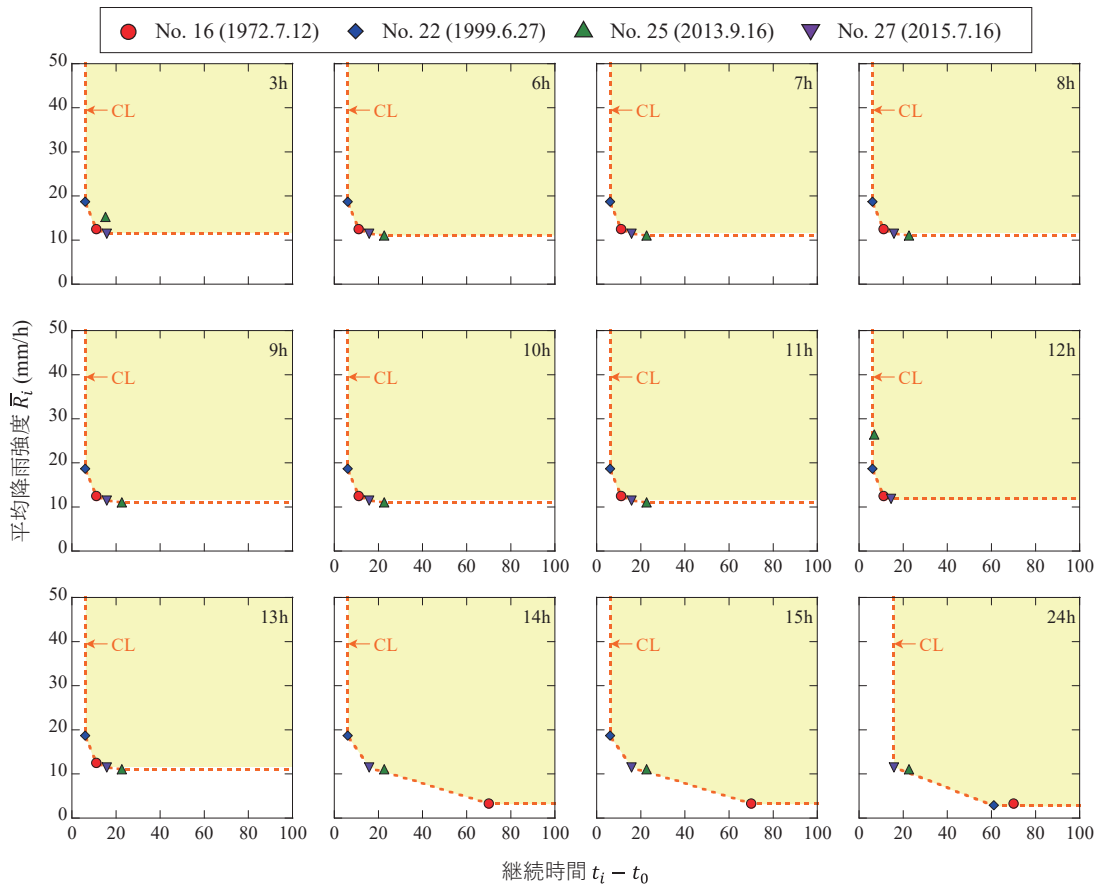


図-5 各方法により算出した CL

～2006年は、D1-013A-8（ログ電子株式会社）、2006～2011年は、複数のロガー（株式会社キーエンス）の組み合わせ、2013年以降は、CR-1000（CAMPBELL SCIENTIFIC、INC.）のデータロガーを使用した。

## (2) 分析方法

一連の降雨イベントを定義するための無降雨時間の設定について検討するため、3、6、7、8、9、10、11、12、13、14、15、24時間の12通りで分析を行った。分析する降雨イベントとして、1930年以降の累積雨量が150 mm以上（12時間無降雨でリセット）の大雨時の降雨イベント（表-1）を使用した。2013～2015年（No. 25～27）以外の降雨イベントの降雨量データは、計測点から約5.5 km離れた気象台（京都府 京都）のデータを用いた。

2章でも示したが、 $t_{sat}$  を求めるに当たり、テンシオメータによる計測期間（2004～2015年）においては、計測結果を用いて求め、計測期間外においては、Sako et al.<sup>7)</sup>が示した基準値（1時間雨量が4.0 mm/h以上、累積雨量が7.0 mm以上）を用いた。

2章で示したCLの設定については、観測点近傍で発生した4回の崩壊時（No. 16, 22, 25, 26）を用いて設定した。分析した各時間設定時におけるCLを図-5にそれぞれ示す。図-5に対して閾値を超えたにも関わらず崩壊が発生しなかった降雨イベントを空振りと定義した。なお、設定した時間数によって、一つの降雨イベント内で何度もリセットされ、複数の降雨イベントを形成する可能性がある。そのため、空振りが少ないほど最

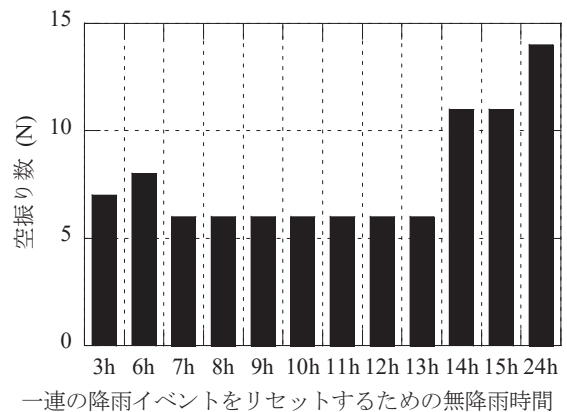


図-6 各無降雨時間の設定における空振り数

適な時間設定として評価した。

### (3) 分析結果と考察

図-6に、各無降雨時間の設定における空振り数を示す。無降雨時間を14時間以上に設定することで、空振り数は大幅に増加した。これは、図-5のCLでも分かるように、1999年の崩壊事例（No.22）のプロットの平均降雨強度が小さくなったためである。つまり、一連の降雨イベントをリセットするための無降雨時間が長いと、一連の降雨イベント期間が長くなるため、飽和からの計測時間も長くなり崩壊時の平均降雨強度の値が小さくなったためである。また、6時間以内においても、空振り数が若干増加した。一方、7時間～13時間では、空振り数が最も少ない6件だった。そのため、本斜面のデータを用いた修正I-D法の分析においては、一連の降雨イベントの無降雨時間の設定を7時間～13時間に設定することが最適であることがわかった。そのため、現行で設定している12時間無降雨でリセットは問題ないことが確認できた。

## 4. おわりに

本論文では、筆者らが提案した修正I-D法による斜面崩壊の予測精度向上に向け、一連の降雨イベントの定義に必要な無降雨継続時間の時間の設定について検討した。その結果、本斜面の分析した計測地点においては、最適な時間の設定は7時間～13時間であった。14時間以上になると、急激に空振り数が増加する傾向となり、6時間以下では微増する結果となった。そのため、当初設定していた12時間の時間設定で問題ないことが確認できた。一方で、他地点での展開を行う場合、本論文で検証した最適な時間の設定は変わることから、再度分析する必要があると考える。

### 参考文献

- 1) Ishihara, Y. and Kobatake, S.: Runoff model for flood forecasting, *Bull. D. P. R. I., Kyoto Univ.*, Vol. 29, No. 1, pp.27-43, 1979.
- 2) Caine, N.: The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows, *Geografiska Annaler. Series A, Physical Geography*, Vol. 62, No. 1/2, pp.23-27, 1980.
- 3) Saito, H., Nakayama, D., and Matsuyama, H. : Relationship between the initiation of a shallow landslide and rainfall intensity-duration thresholds in Japan, *Geomorphology*, Vol. 118, No. 1-2, pp.167-175, 2010.
- 4) 檀上徹・酒匂一成・藤本将光・石澤友浩・伊藤真一・深川良一：地下水位計測結果を加味した雨量指標による新たな斜面安定性評価手法の提案，土木学会論文集C（地圏工学），Vol. 77, No. 1, pp.87-102, 2021.
- 5) 社団法人地盤工学会：豪雨時における斜面崩壊のメカニズムおよび危険度評価，地盤工学・実務シリーズ23，pp.107-131, 2006.
- 6) 酒匂一成・深川良一・岩崎賢一・里見知昭・安川郁夫：降雨時の斜面災害防止のための重要文化財周辺斜面における現地モニタリング，地盤工学ジャーナル，Vol. 1, No. 3, pp.57-69, 2006.
- 7) 里見知昭・酒匂一成・安川郁夫・深川良一：降雨時の表層すべり型崩壊に対する斜面モニタリングに関する研究，地盤の環境・計測技術に関するシンポジウム2008論文集，pp.27-32, 2008.
- 8) Sako, K., Fukagawa, R. and Satomi, T.: Slope Monitoring System at a Slope Behind an Important Cultural Asset, *Journal of Disaster Research*, Vol.6, No.1, 2011.
- 9) 酒匂一成，深川良一，安川郁夫，里見知昭：清水寺敷地内斜面における地盤調査結果，歴史都市防災論文集，Vol. 3, pp.105-110, 2009.
- 10) （社）日本道路協会編：「道路土工のり面工・斜面安定工指針」，p445, 2000.
- 11) Masaoka, N., Kosugi, K., Yamakawa, Y. and Tsutsumi, D.: Processes of bedrock groundwater seepage and their effects on soil water fluxes in a foot slope area, *Journal of Hydrology*, Vol. 535, pp.160-172, 2016.