

## 確率年を用いた降雨・融雪流出が擁壁背面水位に与える影響に関する研究

中央大学大学院	学生員	富澤 彰仁
中央大学大学院	学生員	呉 修一
中央大学大学院	フェロー会員	江花 亮
中央大学理工学部	フェロー会員	山田 正

### 1. はじめに

わが国の地形は山地と丘陵地帯が国土の70%を占めており、自然の斜面が多く平坦な土地は少ない<sup>1)</sup>という特徴を有している。しかし、この限られた平坦な土地もすでに様々な建築物で埋め尽くされ、新たに住宅地や公共施設、道路等の建設計画を図ると、必然的に山際や山間部のような不安定な自然斜面や切土斜面を利用せざるを得ない。この元来日本に多い自然斜面は時間による風化や、台風、地震、豪雪などの自然災害により、人為的な理由によるものでなくとも自然に斜面崩壊や地滑りが発生している。また、土砂災害は梅雨期から台風期の豪雨によって発生する事が多く、土砂災害に対する警戒・避難態勢も、連続降雨量、時間最大降雨量などの降雨を対象として構築されている。しかしながら、寒冷地帯では融雪に起因する土砂災害が頻繁に発生し、多くの人命・財産が失われている。現行の土砂災害警戒・避難システムに融雪の効果は考慮されないのが現状である。本研究では、過去の融雪出水に伴い発生した擁壁崩壊事故を一例とし、水文・気象・地質特性の観点から融雪流出が擁壁崩壊に与える影響を定量的に検討し、法面の安定性を検証したものである。また、寒冷地における融雪量を確率年の概念を用いて評価する法面保護設計手法を新たに提案するものである。

### 2. 擁壁崩壊事例

#### 2-1. 概要

過去の融雪出水に伴い発生したと考えられる擁壁崩壊事故を一例とし、その事故状況について述べる。対象としたのは、1974年3月7日に発生した土砂崩壊であり、崩壊箇所は、片側が急峻な山腹、他方は一級河川にはさまれた山間部道路の斜面である。法面防護工として法面擁壁とコンクリートブロック積擁壁が延長約70mの長さで施工されていた。その内の50m区間の法面防護工が崩壊し道路を埋没させた。事故発生当日は晴天であり、その年は近年稀に見る豪雪年であったこと、擁壁箇所は集水しやすい地形に位置していたことに加え、擁壁の水抜き孔が広範囲にわたり目詰まりを起こしていたこと等が挙げられるが、総合的にみて擁壁崩壊事故の主要因は融雪流出であると考えられる。

#### 2-2. 気象条件及び地質・地形特性

解析対象とした気象データは、事故発生現場（標高：357m）から西方約7km地点に位置する気象台観測所（標高：290m）のデータである。事故発生前1週間の日平均気温を事故前10年間について検討すると、10年間の日平均気温は-0.22であり、事故発生年は1.50であったことから3月初旬の気温としては高い気温であったと言える。年最大積雪深に関しても事故発生前9年間の平均187cmに対し事故発生年が302cmと例年の約2倍を記録しており、豪雪年であったことが容易に推測できる。ここで、事故発生年の事故発生日までの降雪量[cm]、積雪深[cm]、日平均気温[ ]、降水量[mm]を図-1に示す。これより、3月に入ってから温度の急上昇に伴い積雪深が減少しており、融雪流出が生じたものと考えられる。2月中の積雪深の減少は気温が0以下の状態で生じており、雪が圧密沈下されたものと考えられる。

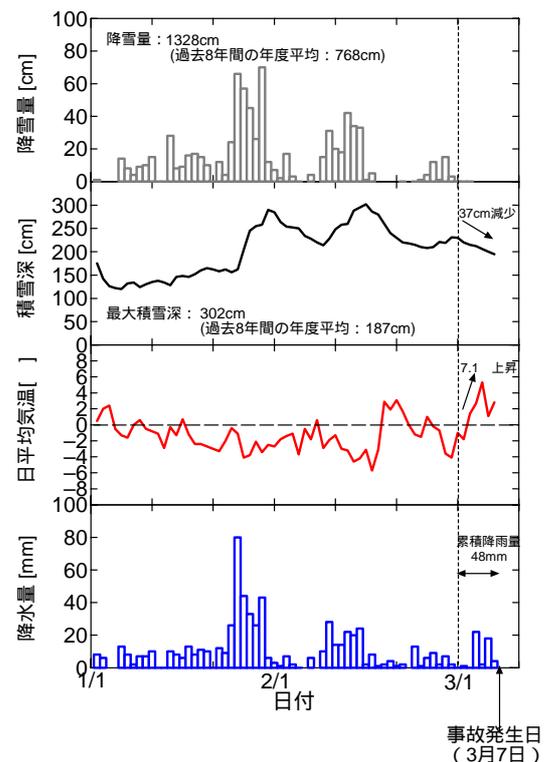


図-1 事故発生日までの降雪量、積雪深、日平均気温、降水量の時系列  
(1/1～3/7, 気象台観測所のデータ)

キーワード 確率年 融雪量 擁壁背面水位 浸透流計算

連絡先 〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27 中央大学大学院 TEL 03-3817-1805 E-mail: tomizawa@civil.chuo-u.ac.jp

擁壁崩壊箇所における透水試験より求めた地層の透水係数の値は  $2.0 \times 10^{-3} \text{cm/s}$  であった。また、事故発生地点の背後には段丘があり、降雨時や融雪時には広い範囲の地表水がここに集まり、これが当該斜面付近に流下する可能性が高いこと、地下には只見川に向って傾斜した難透水層が沢型をなして存在し、これが当該区間に向っているため地下水もここに集まり流下する可能性が高いことが事後報告書によって報告されている。

3. 融雪量の算出及び確率年評価

3-1. Degree・Day 法による融雪量の算出

図-1 に示す日平均気温を用い事故発生日前の1週間・1ヶ月間における累積融雪量を Degree・Day 法より求める。式(1)で示される Degree・Day 法とは、融雪に寄与するのはある一定の温度以上の気温のみであり、当該期間の有効気温を積算したものに融雪係数をかけ求める方法である。

$$\sum M = k \sum_{Ta-Tc>0} (Ta - Tc) \dots (1)$$

ここに、 $M$ : 積算融雪量[mm],  $T_a$ : 気温[ ],  $T_c$ : 融雪限界気温[ ],  $k$ : 融雪係数[mm/ /day]である。融雪に寄与するのは 0 以上であり、 $T_c=0$  とした。融雪係数  $k$  の値に関しては、日本においては時空間的にも変化するが、3~7 程度の値をとると言われている<sup>2)</sup>。よって、融雪係数  $k=3, 5, 7$  として融雪量を求めた。

2月1日から3月7日まで求めた日融雪量[mm/day], 累積融雪量[mm]を図-2に示す。求めた結果より2月1日~3月7日までの累積融雪量は73.5mm~171.5mm, 事故発生日までの1週間(3月1日~3月7日)に39.9~93.1mm生じ、これに降雨量48mmを記録しているため、事故発生日までの一週間に斜面へと供給された水分量は85.9~139.1mm程度に相当することがわかった。

3-2. 積雪深の減少量から求める融雪量

ここでは積雪深の減少量から融雪量の算出方法について述べる。図-3は1974年2月24日~3月7日における事故発生地点(標高324m, 斜面崩壊地点から東へ約7km)の積雪深, 日平均気温, 降水量の時系列である。これより2月24日~28日にかけて26mmの降水があり、その時の積雪深の増加が36cmであることがわかる。気温が0以下であったことから、この降水は雪であるとする。よってこの時の雪の密度は降水量(26mm)を積雪深の増加分(36cm)で除すことにより求めることができ、これを新雪の密度とする。また、この期間で積もった雪は2月28日~3月2日にかけて積雪深が11cm減少した。気温が0以下であったことから、この積雪深の減少は雪の締まりに寄与すると考え、雪の質量が一定であるとする降雪直後の新雪の質量と雪の締まりによる積雪深の減少量の関係から雪が締まった後の密度を求めることができる。求めた結果より、気温が急激に上昇した1974年3月3日~3月7日において、28.3mm~29.8mmの融雪が生じていることがわかった。

3-3. 降雨・融雪量の確率年評価

わが国の土砂災害は梅雨期から台風期の豪雨によって発生する事が多い。例えば河川治水計画では、降雨量や流量を評価するために、確率年の概念を用いている。災害を引き起こし得る外力としてどのようなものがあり、それ

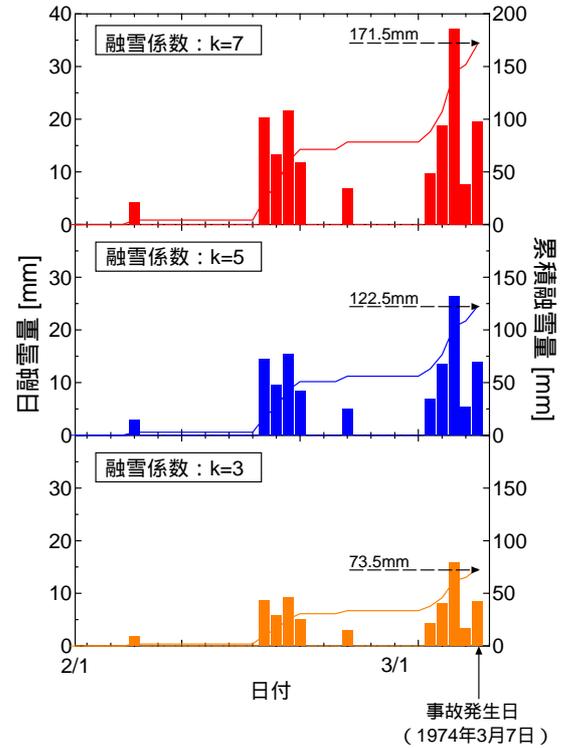


図-2 Degree・Day 法より求めた累積融雪量[mm]及び日融雪量[mm/day]

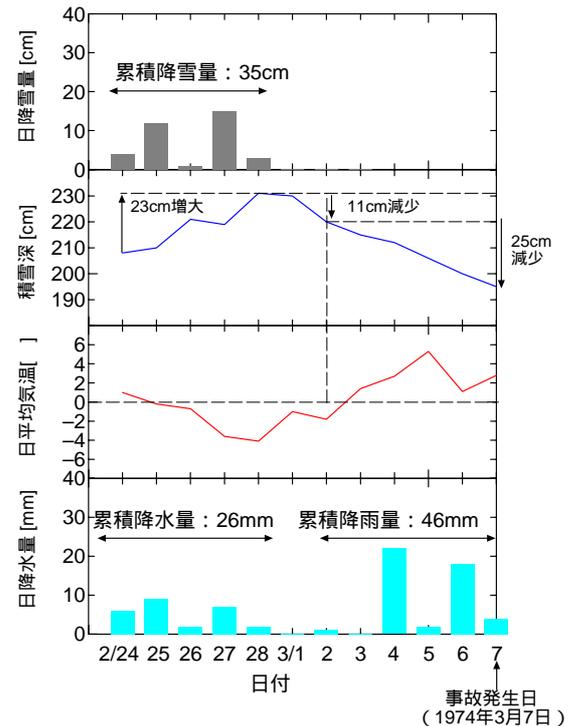


図-3 2/24~3/7 までの降雪量, 積雪深, 日平均気温, 降水量の時系列(1974年)

らをどのように評価するかといった問題は非常に重要である。融雪は無視できない外力の一つでありながら、外力として評価された例はない。このことを受け、本論文では、融雪量を確率年の概念を用い評価することにより、融雪流出が前述の擁壁に与える影響を定量的に検討する。積雪地域における融雪量を、治水計画における降雨量や流量と等価に扱うために、ここでは外力としての融雪量の評価方法について述べる。3章にて示したように、融雪量は積算気温や積雪深の減少量で表現可能であることから、ここでは融雪量を確率年の概念を用い評価する。確率年を評価するにあたり融雪量の超過確率は Hazen プロットを用いて求めた。図-4に事故発生地点における Degree・Day 法、積雪深の減少量から求めた融雪量及び降水量の確率年を示す。これより、各方法において算出した金山(事故発生地)での1965~2005年における当該期間(3月1日~3月7日)での累積融雪量が最大で約210mmであり、そのときの確率年は約80年であった。各手法によって求めた事故発生年における融雪量及び降水量の確率年を比較すると、斜面に供給された水量を考慮した場合、つまり融雪量と降水量の合計を考えると、積雪深の減少量より求めた場合及び Degree・Day 法より求めた場合とで大きな差異は見られない。現在、法面保護対策において融雪に伴う地下水位の上昇は考慮されていない。融雪量を確率年の概念を用い評価し、その融雪量に対して流出計算、斜面の安定計算を行うことにより想定すべき地下水位を算出することが可能となる。これにより、融雪量の確率年評価が寒冷地における斜面・法面崩壊を考える上で無視できない指標の一つであることを示した。

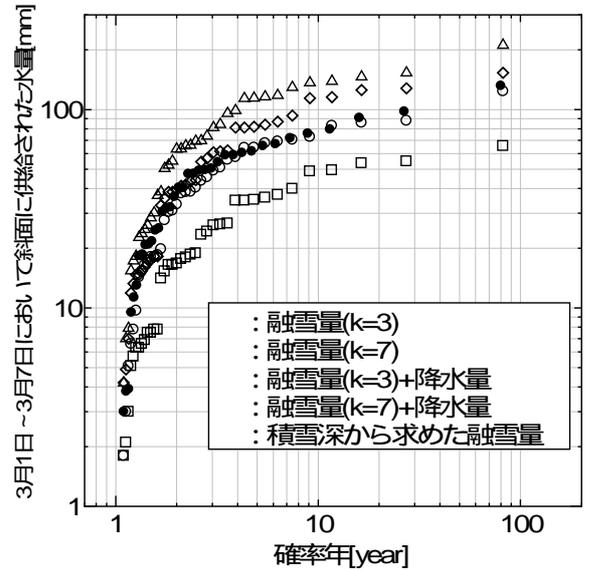


図-4 融雪量及び降水量と確率年の関係

#### 4. 融雪流出が擁壁背面水位に与える影響について

##### 4-1. 事故発生年における擁壁背面水位の検証

現在、法面保護対策において融雪に伴う地下水位の上昇は考慮されていない。前章にて融雪量を確率年の概念を用い評価した。本章では、その融雪量に対して不飽和浸透理論に基づく数値計算を行い、事故発生斜面を想定した再現計算を試みる。以下に不飽和浸透理論に基づく浸透流の計算概要を示す。斜面に供給された水分は不飽和鉛直浸透の後、斜面表層付近の不飽和水面で飽和に達した後、飽和側方流として斜面に沿って流下する。不飽和鉛直浸透流の基本式を式(2), (3)に示す。

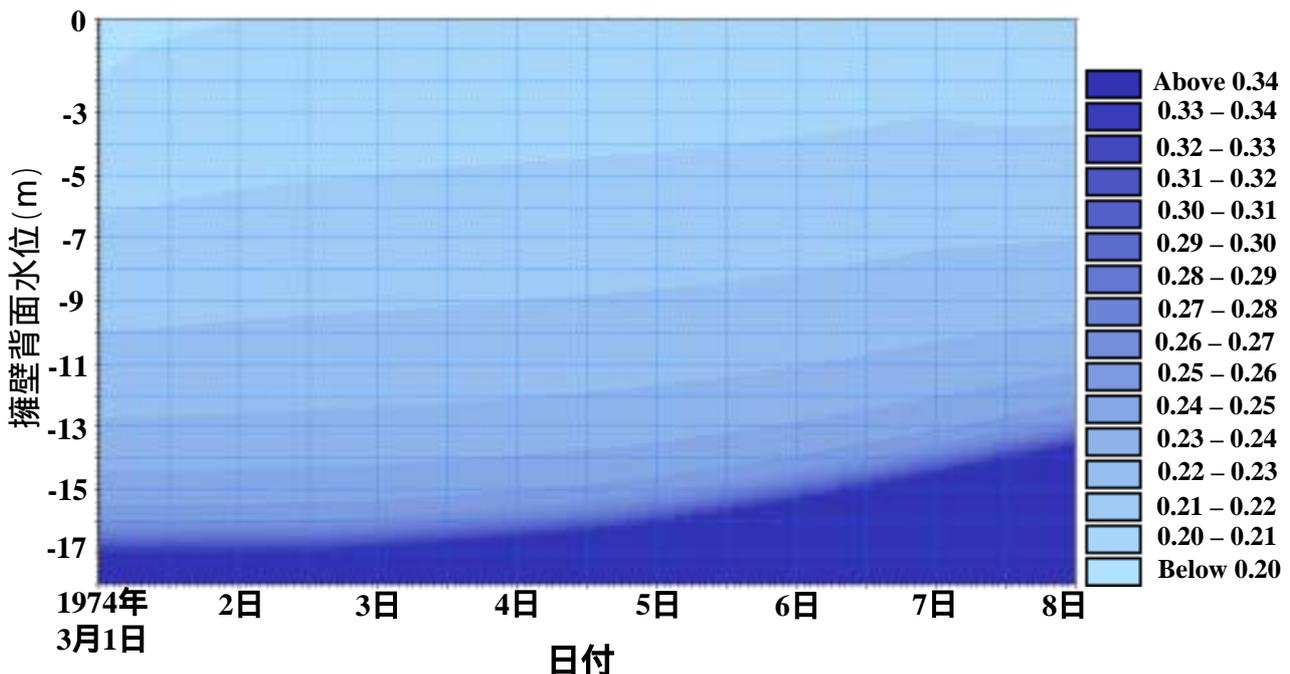


図-5 事故発生年における擁壁背面水位の時系列

$$C \frac{\partial \psi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( K \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) + \frac{\partial K}{\partial z} \quad \dots (2) \quad C = \frac{\partial \theta}{\partial \psi} \quad \dots (3)$$

ここに、 $\theta$ :含水率、 $K(\theta)$ :不飽和透水係数、 $C$ :水分特性曲線の勾配、 $\psi$ :圧力水頭である。鉛直浸透の後不透水面上で飽和に達した時点以降はダルシー則に従い飽和側方流が発生するものとして計算を行う。計算に用いた斜面は単位幅とし、水抜き穴の目詰まりを考慮するために斜面下流端の境界条件を不透水条件とした。また、土壌中の初期水分量は降雨・融雪の影響のみを見るため、無降雨状態で定常に達するまで計算を行ったのち、その定常状態を初期条件として計算を行った。3章における検討から斜面に供給された水分量として降雨強度20mm/dayの矩形降雨を斜面に1週間与えた。想定する斜面は、事故報告書を参考に、斜面長:24m、土層厚:17m、有効空隙率:0.35、飽和透水係数: $2.0 \times 10^{-3}$ cm/s、斜面勾配:45°の単一斜面とした。計算結果を図-5に示す。浸透流の計算結果から擁壁背面水位は7日間で約4.5m上昇する結果となり、擁壁を設計する場合この水位の上昇をどのように扱うかは非常に重要となる。以上の結果から、寒冷地において融雪の影響が無視し得ないことを示した。

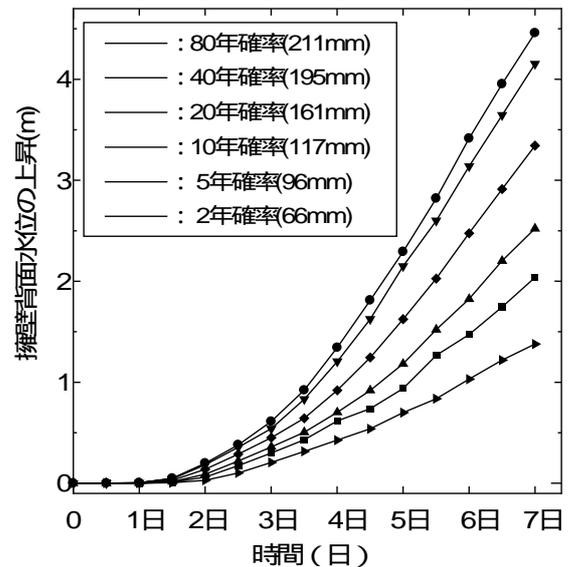


図-6 確率年に対する擁壁背面水位上昇の時系列

#### 4-2. 確率年から決定した降雨・融雪量を用いた浸透流計算

確率年によって評価された融雪量は、寒冷地における斜面・法面崩壊を考える上で考慮すべき指標の一つである。ここでは、事故発生地点である金山において異なる確率年の融雪量を斜面に与え擁壁背面水位をみる。つまり、想定すべき外力を確率年を変えることにより表現する。想定する降雨・融雪量の確率年は2, 5, 10, 20, 40, 80年の6通りで融雪量として表すと総量で65.7~211.0mmとなる。求めた結果を図-6に示す。これより80年確率で擁壁背面の水位は約4.7m上昇することがわかる。浸透流計算を行うことにより想定すべき地下水位、すなわち擁壁背面に作用する水圧を算出することが可能となり、擁壁設計に用いる外力において降雨と同様に融雪量を定量的に評価可能であることを示した。

### 5. まとめ

本論文は、寒冷地における融雪を考慮した擁壁設計手法の構築を目的とし、融雪量の確率年評価を行い、確率年に対応した融雪量に対して浸透流計算を行うことにより、擁壁背面における水位を推定した。以下に得られた知見を述べる。

- (1) 擁壁背面地盤の崩壊の原因となる降水量及び融雪量に関して Degree・Day 法、積雪深の減少量から求める方法の2通りを用い融雪量を定量的に算定した結果、事故発生年である1974年3月1日~3月7日において、最大で140mm程度の水量が斜面に供給されており、例えば80年確率の融雪量を想定した場合、1週間の累積融雪量として210mm程度の融雪量が生じていたことがわかった。
- (2) 融雪量を確率年を用い評価するという新たな考えを提案した。これにより寒冷地の法面保護対策において現在は考慮されていない融雪量を定量的に評価することが可能となった。
- (3) 確率年で評価された融雪量・降水量に対して浸透流計算を行うことにより、想定すべき外力が擁壁背面水位に与える影響を定量的に評価することが可能となった。

### 参考文献

- 1) 株式会社 産業技術サービスセンター: 斜面防災・環境対策総覧, 斜面防災・環境対策技術総覧編集委員会編集, pp.27-40, 2004
- 2) 太田岳史: 水文・水資源ハンドブック, 水文水資源学会編集, pp.54-55, 1997.
- 3) 三森利昭, 小池雅洋, 弘中貞之, 虫明功臣: 土壌水分試験結果を用いた不飽和透水性の推定, 生産研究, 第43巻, 第2号, pp.110-113, 1991
- 4) 窪田順平, 福嶋義宏, 鈴木雅一: 山腹斜面における土壌水分変動の観測とモデル化, 日林誌, 69, pp.258-269, 1987