

浸透流計算を用いた斜面安定評価に関する研究

中央大学大学院	学生員	新谷 勇樹
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

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。そこで著者らは従来から寒冷地における新しい法面保護設計手法の構築を目的とし、降雨量と同様に融雪量を設計外力と考え、降雨量・融雪量の確率年評価を提案している。本論文は、斜面崩壊の大きな原因となりうる降雨及び融雪に伴う擁壁背面水位の上昇に着目し、降雨・融雪量に関して確率年評価を用い、水文・地質・地形特性の観点から確率年で決定した降雨量・融雪量を用い浸透流計算を行うとともに、擁壁背面水位が斜面に与える影響を評価するために斜面安定計算に地下水位の上昇を考慮して斜面安全率を算出し、擁壁背面水位と斜面安全率の関係を示したものである。

2. 融雪量の算出方法及び確率年評価

2-1. 融雪量の算出方法

著者らは寒冷地における斜面及び擁壁崩壊を防ぐことを目的とし、設計外力として降雨量と併せて融雪量も評価することを提案している。設計外力として融雪量进行评估するためには、当然のことながら正確な融雪量の算出が必要である。著者らは既往の研究より Degree・Day 法と熱収支法によって融雪量を算出している¹⁾。融雪に影響する因子として、どこまで考慮すべきか検討するため融雪量を気温、日射、風速などの時々刻々と変化している多くのデータを用いた熱収支法と日ごとの気温を用いた Degree・Day 法とを比較した。融雪に寄与する気象因子としては、様々なものが挙げられるが、熱収支法を用いる際に必要な気象データを観測していないような地点においても気温データのみを利用した Degree・Day 法を用いて算出する。積雪量の多い地域を一例として対象とし、気温データは気象庁の気象観測データを用いた。Degree・Day 法とは、当該期間内における融雪に寄与するある一定温度以上の有効気温の積算値に融雪係数をかけ、算出する方法である。本論文では、融雪に寄与するのは0 以上として計算を行った。融雪係数 k の値に関しては、日本で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²⁾。ここでは、 $k=3,5,7$ と係数を3 通り与え計算を行った。比較対象期間は1965 年~2005 年の41 年間において、一般的に融雪期である3月1日から3月7日までの7日間を対象とした。

2-2. 融雪量の確率年評価

河川治水計画を策定する際に確率年の概念を用いて降雨量や流量を評価することは一般的に広く行われて

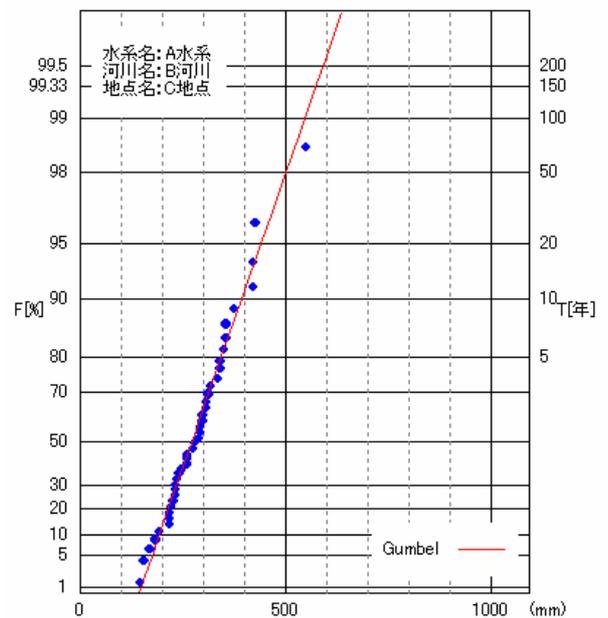


図-1 斜面供給水量の確率年($k=7$)

キーワード 融雪量, 浸透流計算, 斜面安全率

連絡先 〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27 中央大学理工学部 TEL:03-3817-1807

いる。しかしながら、融雪量に対して確率年を用いて評価した事例は少ない。これは融雪量への影響因子として気温、日射、風速、地熱など多くの要因が挙げられるため定量的評価が難しいからである。しかしながら積雪地域では、融雪期に斜面・法面の崩壊が発生し、重大な事故をもたらすことが度々ある。このような斜面崩壊は、降雨を伴わない天候下で発生することが多く、融雪水が地盤内に多量に供給されることに起因して土中の間隙水圧が増加し、有効応力が低下することにより発生するものと考えられている。そこで、上記のように、融雪量は積算気温で表現可能であることから、ここでは推定することが困難な外力としての融雪量を確率年の概念を用い定量的に評価する。確率年を評価するにあたり Gumbel 確率紙を使い Gumbel 分布を用いて求めた。図-1 は融雪係数 $k=7$ を与えた Degree・Day 法から求めた斜面供給水量(融雪量+降雨量)の確率年である。これより算出した 1965~2005 年における選定期間(3月1日~3月7日)での斜面供給水量(融雪量+降雨量)が最大で 550mm であり、そのときの確率年が 100 年であることがわかった。現在、法面保護対策において融雪に伴う地下水水位の上昇は考慮されていない。積雪の多い地域における土砂災害などを引き起こす外力の一つとして融雪量を確率年の概念を用い評価し、その斜面供給水量(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地下水水位を算出することが可能となり、斜面の安定計算に作用外力として確率年の概念から決定した融雪量・降雨量を用いることにより新しい法面保護設計手法の構築が可能になる。

3. 確率年から決定した降雨量・融雪量を用いた浸透流計算

現在、法面保護対策において融雪に伴う地下水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。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作用する外力として考慮すべき指標の一つである。ここでは、異なる確率年の降雨・融雪量を斜面に与え、かつ土壌特性値を変化させることで気象・土壌の両特性が擁壁背面水位に与える影響を評価する。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、山地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計算の概要を示す。斜面に供給された水分は不飽和鉛直浸透の後、斜面表層付近の不透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(1),(2)に示す。

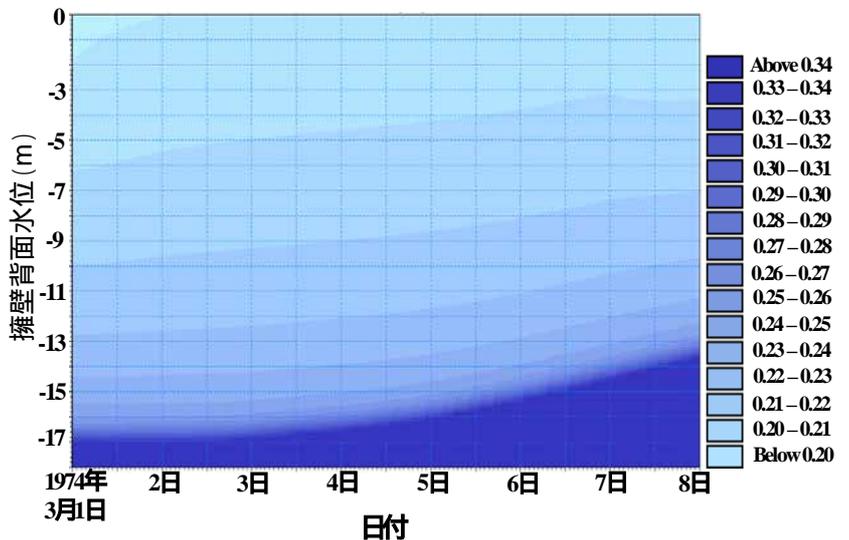


図-2 含水率の鉛直分布の時系列

$$C \frac{\partial \psi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) + \frac{\partial K}{\partial z} \dots (1)$$

$$C = \frac{\partial \theta}{\partial \psi} \dots (2)$$

ここに、 θ : 含水率, $K(\theta)$: 不飽和透水係数, C : 水分特性曲線の勾配, ψ : 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 Darcy 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、実際の擁壁では水抜き

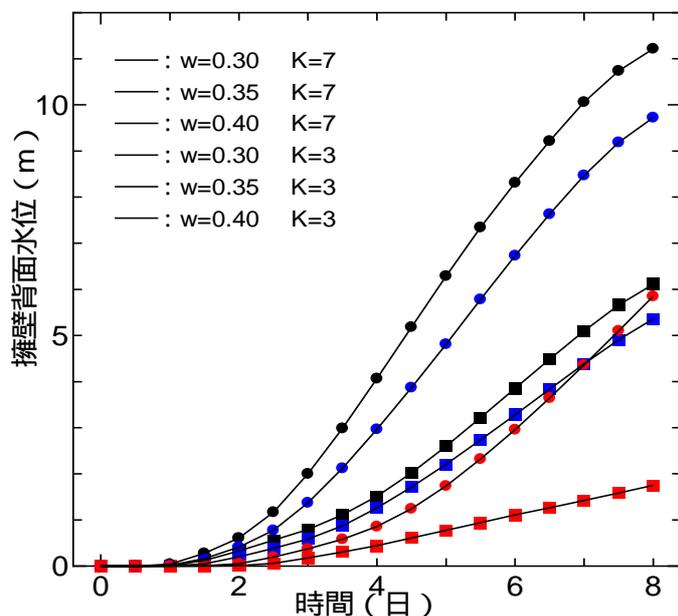


図-3 確率年に対する擁壁背面水位上昇の時系列

孔が設置されているにも関わらず、土砂で目詰まり等を起こし機能しない例が多いことを考慮し、斜面末端での境界条件は不透水条件とした。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。想定する斜面は、斜面長：24m、土層厚：17m、降雨・融雪量の確率年は融雪係数 $k=3.7$ に対して確率年 80 年を用い、土壌特性値は土の保水能力という観点から有効空隙率に着目し、 $w=0.30, 0.35, 0.40$ の 3 通りを与えた。また、山地斜面を想定し飽和透水係数 K_s の値は $K_s=2.0 \times 10^{-3}(\text{cm/s})$ 、斜面勾配は 45° の単一斜面とした。求めた結果を図-2 に示す。また、複数の確率年に対する擁壁背面水位の上昇の時系列を図-3 に示す。これより、土壌特性値等のパラメータをとり得る範囲で変化させると 100 年確率で擁壁背面の水位は最大で約 11m、最小でも約 2m 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、寒冷地においては擁壁設計に用いる外力として降雨と同様に融雪量を定量的に評価することが可能であることを示し、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。

4. 地下水位の上昇を考慮した斜面安定計算

現在までに起きた斜面・法面崩壊の大きな原因の一つとして降雨及び融雪による地下水位の上昇が上げられる。降雨・融雪で地下水位が上昇することにより間隙水圧が増加するため、単位体積あたりの水の量が增加することにより斜面の土の滑動力が増加し、土塊の断面に作用している全応力は有効応力と間隙水圧の和で表されるため間隙水圧の増加に伴い土の有効応力は低下し、土中に水が含まれることにより時間と共に土が膨張し粘着力などの支持力の低下を引き起こす³⁾。ここでは、地下水位の上昇が斜面の安全率に与える影響を評価するため、斜面安定計算を行う。本論文では土層厚：17m、斜面長：24m の斜面で円弧すべり面・複合すべり面の 2 つのすべり面を仮定した。円弧すべり面・複合すべり面の安定計算は、土塊とすべり面の間で発揮される土塊の滑ろうとするせん断力と土塊が滑るのを阻止しようとする粘着力などの抵抗力の比率によって求める。すべり面より上の土塊をいくつかのスライスに分割し、各スライスで発揮されるそれぞれの力を足し合わせる Bishop 法を用い、円弧すべりの中心点は仮定したすべり面における最小安全率をもつ点を決め、等しい安全率をもつ点を結ぶラインの中心点を円弧すべりの中心点とした。Bishop 法による安全率の算出は式(3)により表される⁴⁾。

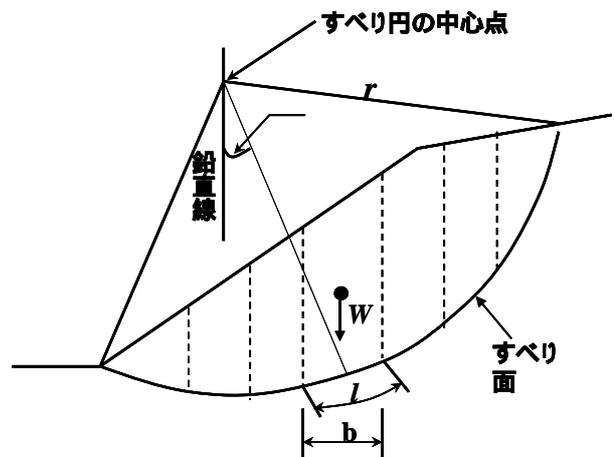


図-4 円弧すべりの概略図

$$F_s = \frac{\{c \cdot l + (W - u \cdot b) \cos \alpha \cdot \tan \phi\}}{W \cdot \sin \alpha} \dots (3)$$

ここに、 F_s ：安全率、 c ：粘着力(kN/m^2)、 ϕ ：内部摩擦角($^\circ$)、 l ：スライスで切られたすべり面の長さ(m)、 W ：スライスの全重量(kN/m^2)、 u ：間隙水圧(kN/m^2)、 b ：スライスの幅(m)、 α ：スライスで切られたすべり面の中心とすべり面の中心を結ぶ直線と鉛直線のなす角($^\circ$)である。土の単位体積重量を $\gamma_t=1.8(\text{tf/m}^3)$ 、水の単位体積重量を $\gamma_w=1.0(\text{tf/m}^3)$ とした。また土の強度定数に関しては内部摩擦角 $\phi=25^\circ, 30^\circ, 35^\circ, 40^\circ, 45^\circ$ の 5 通り、土の粘着力 $c=0, 5, 15, 25(\text{KN/m}^2)$ の 4 通りで各地下水位に応じて安定計算を行った。求めた結果を図-5.1~5.5 に示す。これより、斜面内地下水位にかかわらず円弧すべりのほうが安全率が低くなっている。それはすべり面の総延長が円弧すべり面の方が長いため、その分、円弧すべり面に作用するせん断力が大きくなるためであると考えられる。また、地下水位が上昇するに伴い斜面の安全率が低くなるのは間隙水圧により土に浮力が働き有効重量が軽減したためと言える。また、間隙水圧の増加は土の抵抗力・支持力を低下させるため、斜面崩壊が起こりやすくなっていることを示している。以上により、斜面・のり面を設計する際、降雨量・融雪量に伴う地下水位の上昇も考慮すべきであることを示した。

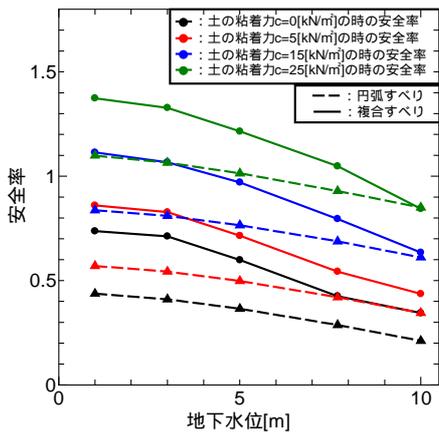


図-5.1 $\phi=25^\circ$ の時の地下水位と安全率の関係

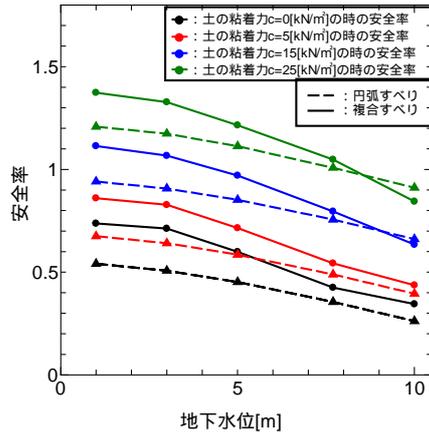


図-5.2 $\phi=30^\circ$ の時の地下水位と安全率の関係

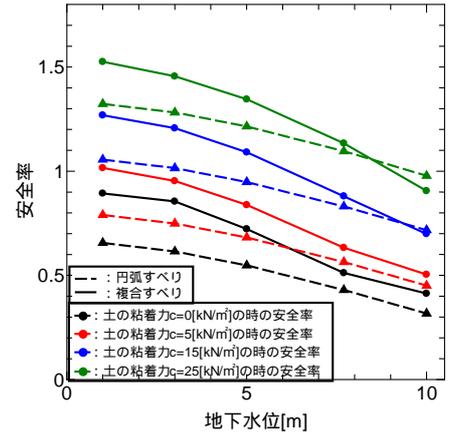


図-5.3 $\phi=35^\circ$ の時の地下水位と安全率の関係

5. まとめ

本論文は、新しい擁壁設計手法の構築を目的とし、降雨量・融雪量の確率年評価を行い、確率年から決定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、地下水が斜面に与える影響を評価するために斜面安定計算を行ったものである。以下に得られた知見を述べる。

- (1) 斜面崩壊における設計外力の一つで、定量的評価が難しいとされる融雪量

を確率年の概念を用いて定量的に評価することが可能となった。例えば、降雨・融雪量を80年確率と想定したときの斜面供給水量は一週間の累積量として550mm程度であることがわかる。

- (2) 確率年で評価された斜面供給水量を用い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。
- (3) 土の強度定数を取り得る範囲で変化させ、斜面安定計算を行うことにより、地下水位の上昇に伴い斜面の安全率が低下することを示した。これは、地下水位が上昇するに伴い間隙水圧により土に浮力が働き有効重量が軽減したためと考えられる。

融雪量を定量的に評価し、地下水位が斜面に作用する外力として大きく影響を与えることが浸透流計算、斜面安定計算をすることにより明らかとなった。以上により、本論文は擁壁設計手法に降雨量・融雪量による地下水位の上昇を確率年の概念を用い、評価する方法を新たに提案するものである。

参考文献

- 1) 新谷勇樹, 富澤彰仁, 呉修一, 江花亮, 山田正: 寒冷地における降水量・融雪量の確率年評価, 第34回関東支部技術研究発表会, -024, 2007.
- 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) 三木五三郎, 中瀬明男, 福住隆二, 持永龍一郎: 演習土質工学, オーム社, pp.133-146, 1969.
- 4) 社団法人 日本道路協会: 道路土工 のり面工・斜面安定工指針, pp.347-348, 2006.

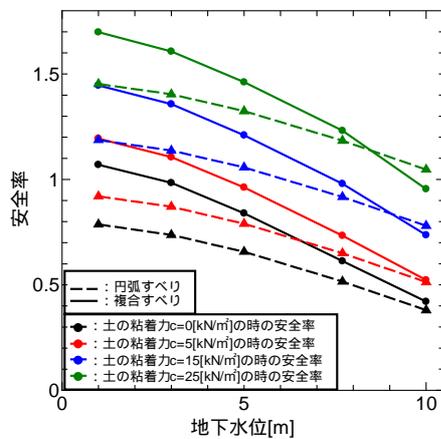


図-5.4 $\phi=40^\circ$ の時の地下水位と安全率の関係

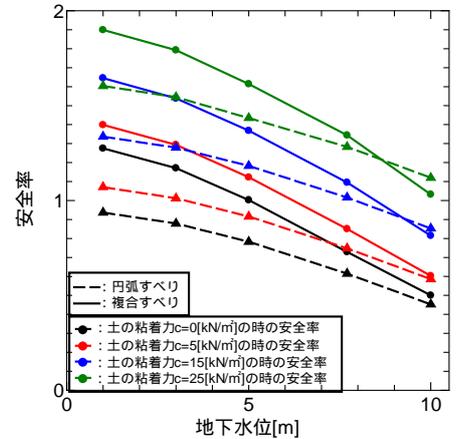


図-5.5 $\phi=45^\circ$ の時の地下水位と安全率の関係