

降雨・融雪量の確率年に基づく擁壁の設計方法に関する研究

中央大学大学院 フェロー会員 江花 亮 中央大学理工学部 学生員 ○植平 健一郎
 中央大学大学院 正会員 渡辺 暁人 中央大学大学院 正会員 渡辺 直樹
 国際航業（株） 正会員 新谷 勇樹 中央大学理工学部 フェロー会員 山田 正

1. はじめに

日本における気象の特徴の一つとして梅雨期から台風期にかけての豪雨が挙げられ、斜面崩壊の多くが降雨によるものであることは良く知られている。一方で、寒冷地では斜面に供給される水量は降雨だけでなく融雪水がもたらす場合があることは明確であるのにもかかわらず、現状の法面保護設計指針・擁壁工指針には融雪の影響は考慮されてはいない。過去には融雪が原因となり人命を失う重大な事故も発生している。そこで本論文は寒冷地に焦点を当てた新しい擁壁の設計方法の構築を目的とし、実際に発生した擁壁崩壊を一例に挙げ、降雨・融雪量の確率年評価を行い浸透流計算から擁壁背面水位を算出した。さらに、斜面擁壁の重量を考慮した安定計算を行い、擁壁背面水位が斜面に与える影響を示した。

2. 擁壁崩壊事例とそれをもたらした気象条件及び地形・地質特性

擁壁崩壊の一例として挙げる箇所は、図-1に示すように片側が急峻な山腹、他方は一級河川にはさまれた山間部道路の斜面である。事故発生日までの降雪量[cm],積雪深[cm],日平均気温[°C],降水量[mm]を図-2に示す。図-2に示されるよう、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である。2月中の積雪深の減少は気温が0°C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。ボーリング調査及び透水試験による、地層構成、透水係数は地表よりそれぞれ、上部礫混じり火山灰層($k_s=1.6 \times 10^{-3}$ cm/s), 砂礫層($k_s=1.9 \times 10^{-3}$ cm/s), 下部礫混じり火山灰層($k_s=5.2 \times 10^{-4}$ cm/s), 角礫凝灰岩層

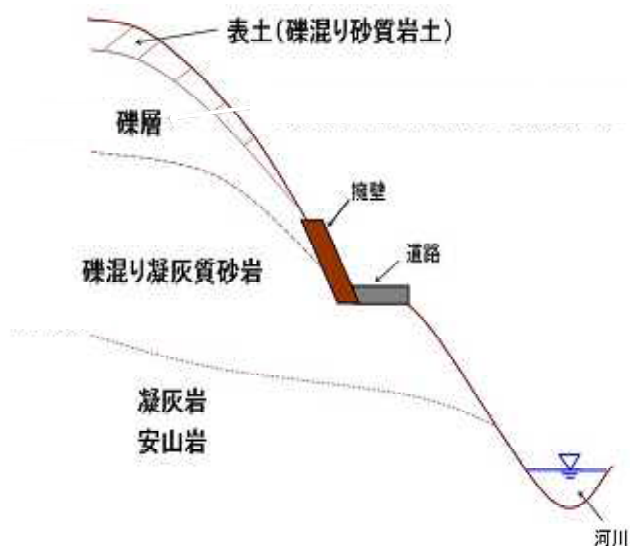


図-1.崩壊斜面の概念図の一例

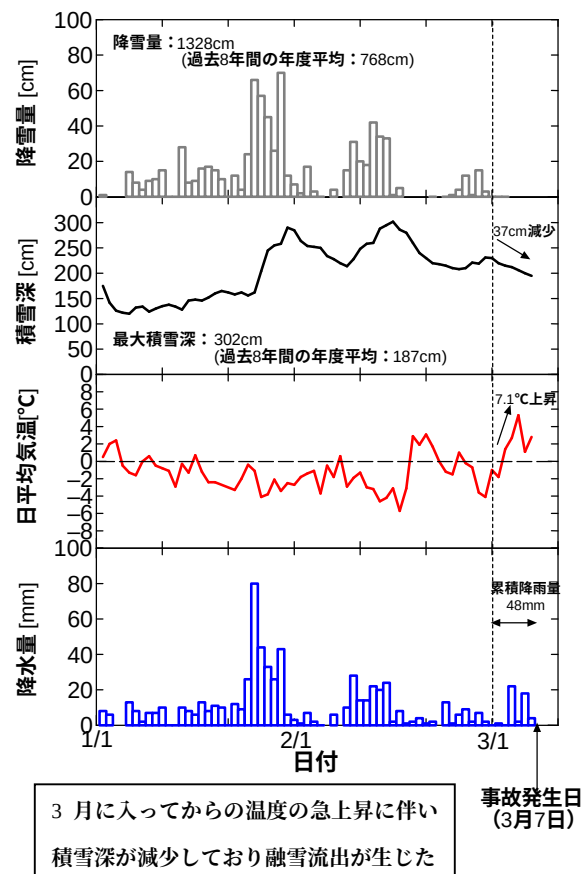


図-2.降雪量、積雪深、日平均気温、降水量の時系列
 (事故現場近傍の気象台観測所のデータ)

キーワード 融雪量, 確率年, 擁壁背面水位, 斜面擁壁重量, 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:03-3817-1805 E-mail:kenichiro-uehira@civil.chuo-u.ac.jp

($k_s=1.2 \times 10^{-4}$ cm/s)である。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、これが斜面付近に流下する可能性が高く、地下には川に向かって傾斜した難透水層が存在し、地下水もここに集水する可能性が高いことが想定できる。

3. 降雨量・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いる。しかし、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事例は少なく、確率年を用いて評価した事例も少ない。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困難であるためである。著者らは従来から、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。寒冷地においては、融雪期に斜面崩壊が発生し、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、融雪水が地盤内に多量に供給されることにより土中の間隙水圧が増加し、有効応力が低下することで発生すると考えられている。ここでは推定が困難な外力としての融雪量を確率年の概念を用いて定量的に評価する。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-3 は融雪係数を 3, 5, 7 の 3 通りに変化させた Degree・Day 法から求めた斜面供給水量（融雪量＋降雨量）の平均の確率年である。選定期間は 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、融雪流出が生じたことから 1965～2005 年の 3 月 1 日～3 月 7 日とした。この結果より、この期間での斜面供給水量（融雪量＋降雨量）は最大で 450mm であり、そのときの確率年が 100 年であった。

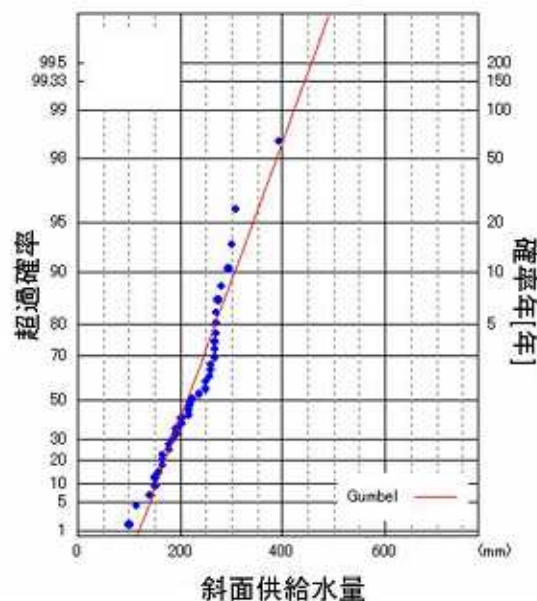


図-3. 斜面供給水量と確率年の関係

4. 浸透流計算から求めた設計外力と地下水位の関係

ここでは、対象とする斜面においてどの程度の降雨量・融雪量が供給されると、どの程度の地下水位に相当するのかを浸透流解析によって検討する。通常擁壁には水抜き孔が設置され、擁壁の背面に溜まる水を排除する役割を持つ。しかし、水抜き孔の内部で細粒土砂が固結し、目詰まりを引き起こすなど、水抜き孔が正常に機能しない例が数多く報告されている。このことを考慮し、本研究では斜面末端での境界条件は不透水条件として斜面浸透流計算を行った。浸透流解析には、Richards の式に基づく二次元飽和不飽和浸透流解析を用いる。土壌特性値は土の保水能力という観点から有効空隙率 $w=0.30, 0.35, 0.40, 0.45$ とし、それぞれに対して飽和透水係数 $K_s=1.0 \times 10^{-4}, 1.0 \times 10^{-5}$ (cm/s) としてパラメータに幅を持たせて計算を行った。斜面

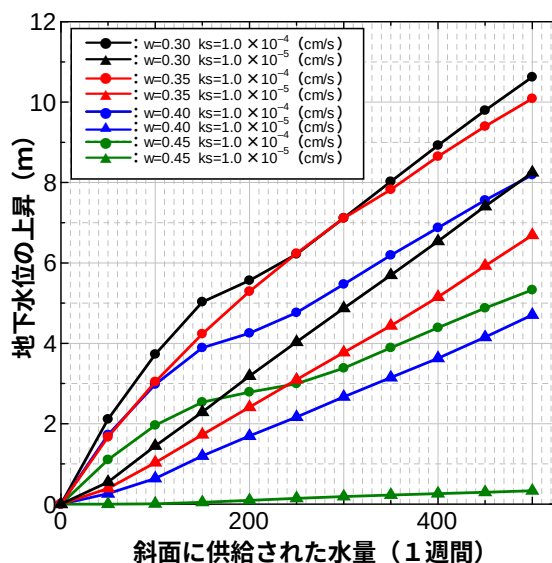


図-4. 土壌特性ごとの斜面供給水量と地下水位の関係

に供給される水量としては、降雨量と融雪量を想定し、1 週間における累積の降雨・融雪量が 50mm～500mm となるようにし、日平均降雨・融雪量を各日に与えた。求めた結果を図-4 に示す。これより、外力と地下水

位の関係が明らかになり、対象とする地点で各々の土壌パラメータを決定することができれば、そのパラメータに対応する外力と地下水位の関係を決定することができる。

5. 擁壁背面地下水位及び擁壁斜面重量と安全率の関係

ここでは、地下水位の上昇及び擁壁斜面の重量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。図-5に安定計算の対象とした斜面の概略図を示す。法面の勾配の影響を調べるために、法面勾配を【55.0° (1:0.7), 63.4° (1:0.5), 73.3° (1:0.3)】の3通りを検討した。図における太線部は斜面擁壁部を表し、斜面擁壁はすべてコンクリートとした。擁壁重量は厚さを変えることで値を変化させ、斜面長は16.7mで一定とした。斜面擁壁厚さは【0.2m, 0.4m, 0.6m, 0.8m, 1.0m, 1.2m, 1.4m, 1.6m, 1.8m, 2.0m】とした。土の強度定数は事故調査報告書を参考に内部摩擦角 $\phi=41.82^\circ$ 、土の粘着力 $c=0[\text{tf/m}^2]$ とした。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(1)により表される²⁾。

$$F_s = \frac{\sum \{c \cdot l + (W - u \cdot b) \cos \alpha \cdot \tan \phi\}}{\sum W \cdot \sin \alpha} \quad \dots (1)$$

ここに、 F_s :安全率、 c :粘着力[tf/m²]、 ϕ :内部摩擦角[度]、 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[tf/m²]、 u :間隙水圧[tf/m²]、 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[度]である。また、土の単位体積重量を $\gamma_t=1.8[\text{tf/m}^3]$ 、コンクリートの単位体積重量を $\gamma_c=2.35[\text{tf/m}^3]$ 、水の単位体積重量を $\gamma_w=1.0[\text{tf/m}^3]$ とした。地下水位は【0m, 1m, 3m, 5m, 7m, 9m】とし、斜面擁壁の重量に応じて安定計算を行った。また、事故調査報告書を参考に対象とする地点の土壌パラメータを用いて、対応する確率年と地下水位の関係を示すと図-3及び図-5より【3m-1年, 5m-2年, 7m-10年, 9m-100年】となる。得られた結果を図-6、図-7に示す。図-6において示す赤色の面は法面勾配 63.4°において斜面擁壁と地下水位による安全率を求め、それらを補間したものである。灰色の面

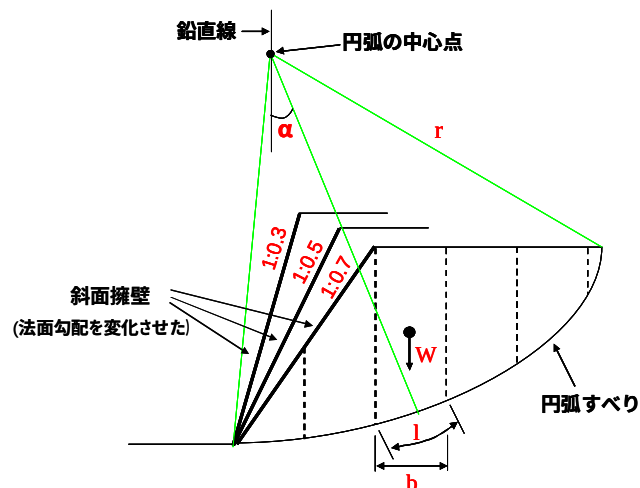


図-5. 対象とした円弧すべりの概略図

安全率に対する法面勾配の影響を調べるために、法面勾配を3通り検討し、Bishop法により安全率を算出した

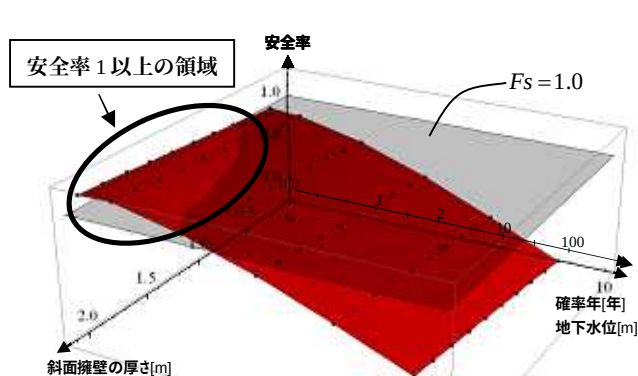


図-6. 斜面擁壁の厚さと地下水位と安全率の関係

【法面勾配: $\theta=63.4^\circ$ (1:0.5)】

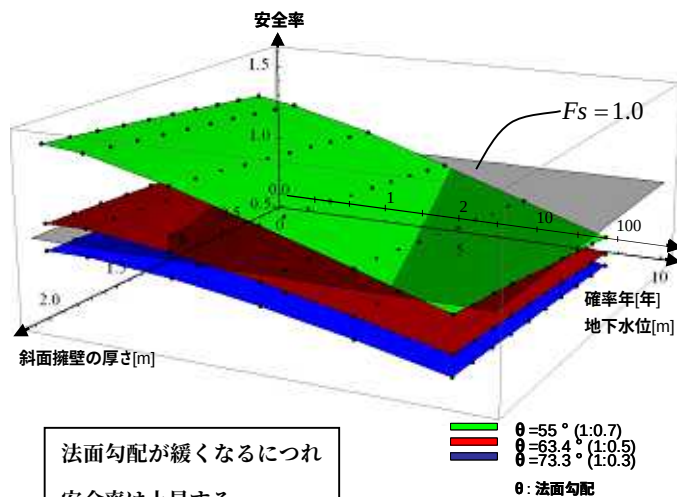


図-7. 斜面擁壁の厚さと地下水位と安全率の関係

法面勾配が緩くなるにつれ安全率は上昇する

安全率の低下は斜面擁壁の重量に比べ、地下水位の上昇による効果のほうが大きい

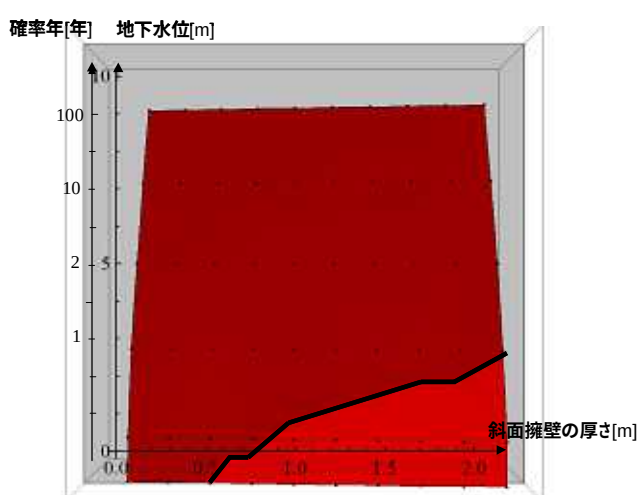


図-8. 斜面擁壁の厚さと地下水位の関係

【法面勾配: $\theta=63.4^\circ$ (1:0.5)】

斜面擁壁の厚さが約 0.6m を下回ると地下水位の値によらず、安全率 1.0 を下回る

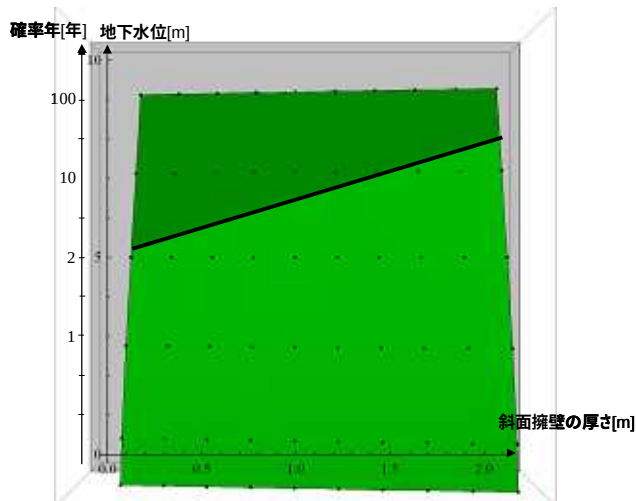


図-9. 斜面擁壁の厚さと地下水位の関係

【法面勾配: $\theta=55.0^\circ$ (1:0.7)】

斜面擁壁の厚さが約 0.6m の時、地下水位約 6m を超えると安全率 1.0 を下回る

は安全率 1.0 を表す。例えば、斜面擁壁の厚さが約 0.6m を下回ると地下水位の値によらず、安全率 1.0 を下回る。また、図-7 においては緑色の面である法面勾配 55.0° の補間結果と青色の面である法面勾配 73.3° の補間結果を重ねて表したものである。この結果からは法面勾配が緩くなると安全率は上昇すると示せた。これらの面を上から見たものを図-8、図-9 に示す。図中に安全率 1.0 との境界線を記した。これらより、地下水位と斜面擁壁厚さとの関係を示せ、安全率 1.0 の境界が明らかになった。これらの結果より、安全率の低下は斜面擁壁の重量に比べ、地下水位の上昇による効果のほうが大きいと言える。これは地下水位が上昇した場合、間隙水圧の増加が土の抵抗力・支持力を低下させ、活動力が斜面擁壁の効果を上回り、斜面崩壊が起こりやすくなると言え、地下水位が安全率に大きく影響し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。

6. まとめ

本論文は、寒冷地における融雪を考慮した法面保護設計手法の構築を目的とし、斜面供給水量として降雨・融雪量を確率年の概念を用いて評価を行った。さらに、求めた斜面供給水量に対して浸透流計算を行い、擁壁背面での水位上昇と擁壁斜面重量に伴う斜面安全率の検討といった一連の流れを示した。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あるが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 100 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 450mm 程度である。
- (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) 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。また、安全率の低下は斜面擁壁の重量に比べ、地下水位の上昇による効果のほうが大きいことがわかる。これは地下水位が上昇した場合、間隙水圧の増加が土の抵抗力・支持力を低下させ、活動力が斜面擁壁の効果を上回り、斜面崩壊が起こりやすくなったと言え、地下水位が安全率に大きく影響していることを示した。

参考文献

- 1) 新谷勇樹, 富澤彰仁, 呉修一, 江花亮, 山田正: 浸透流計算を用いた斜面安定評価に関する研究, 第 35 回関東支部技術研究発表会, 2008.
- 2) 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.