

2022/23 冬季の関越自動車道における雪堤崩壊の事例分析と発生予測

長嶺俊介¹・山田佳汰¹・杉原幸信²・上村靖司²・岩崎伸一³・荒川涼³
 (1:長岡技術科学大学 機械工学分野 2:長岡技術科学大学 工学研究院 機械系
 3:株式会社ネクスコ・エンジニアリング新潟)

1. はじめに

高速道路の路側帯や中央分離帯に形成される雪堤は、道路側に崩れると車線がふさがれるため、自動車への物損被害や交通事故に繋がる可能性がある。これを未然に防ぐためには、適切なタイミングで処理することが重要である。しかし、現状、雪堤崩壊を引き起こすメカニズムは未解明であり、雪堤処理のタイミング等は作業員の経験則に依存しているため、崩壊に至る前に適切にかつ効率的に雪堤処理を行うための定量的な崩壊予測手法の開発が望まれている。現時点での先行研究は、芝崎ら¹⁾による高速道路(関越自動車道、北陸自動車道、上信越自動車道)、並びに一般道路を巡回し、実際に形成された雪堤の形成状態の観察と雪堤崩壊の発生地点の探索・崩壊状態の観察を行っている。

本研究では、「雪堤の崩壊危険度を評価する気象指標を検討すること」、そして、「検討した気象指標を基に、ある時刻における雪堤崩壊の危険度を判断できる閾値、範囲の提案をすること」が目的となる。そのため、気象条件と雪堤崩壊の関係に着目し、2022/23 冬季に関越自動車道で発生した雪堤崩壊を分析した。そして、雪堤の崩壊危険度を評価する気象指標を検討した。

2. 調査方法および結果

本研究では、2022 年 12 月 1 日から 2023 年 3 月 31 日の期間(以降、2022/23 冬季と記す)を対象とし、ウェブカメラシステムを用いて関越自動車道(水上 IC～小千谷 IC)で生じた雪堤崩壊の件数と地点の特徴を調査した。また、雪堤崩壊が起こった日時と地点、雪堤崩壊の分類、地点の特徴(中央分離帯・路側帯、防護柵種別、遮音壁・壁高欄・飛雪防止柵などの有無)を整理した。気象データ(気温、降雪量、積雪深)は本線最寄りのアメダス(湯沢、小出、長岡)の 1 時間ごとの観測結果を用いた。ここで土樽 PA～六日町 IC はアメダス湯沢、六日町 IC～越後川口 IC はアメダス小出、越後川口 IC～小千谷 IC はアメダス長岡の気象データを適用することにした(図 1)。

図 2 に 2022/23 冬季の構造物種別ごとの崩壊件数を、図 3 に 2022/23 冬季の土樽 PA～六日町 IC 間の雪堤崩壊件数と気象の関係を示す。図 2 より、ほとんどの雪堤崩壊は中央分離帯のガードケーブルとガードレールで発生しており、ともに 100 件以上確認された。また、それぞれの崩壊を規模の大きさごとに、雪塊が側帯内に留まり車線上に飛び出さない崩壊をランク B、また雪塊が外側線を跨ぎ、車線上に飛び出

た崩壊をランク A、そのなかでも車線の半分の位置を越えたものをランク AA と分類したところ、崩壊規模の大きいランク A とランク AA の崩壊についても中央分離帯にある構造物上で多いことが分かった。

次に、崩壊件数の多い中央分離帯のガードケーブル、ガードレール、壁高欄において、それぞれ設置されている距離あたりで崩壊件数を求めたところ、ランク B の崩壊では単位距離あたりの崩壊数が最も多いのはガードレール(ランク B:3.4 件/km)だった。しかし、崩壊規模が大きいランク A とランク AA では壁高欄(ランク A:2.6 件/km, ランク AA:0.52 件/km)での崩壊が最も多い結果となった。

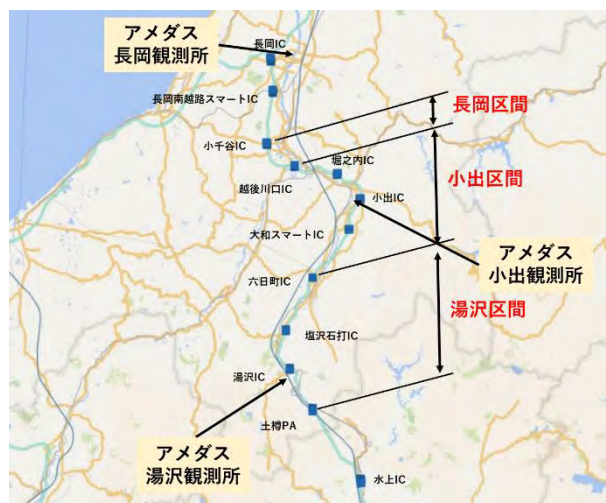


図1 アメダス(湯沢、小出、長岡)を適用した区間

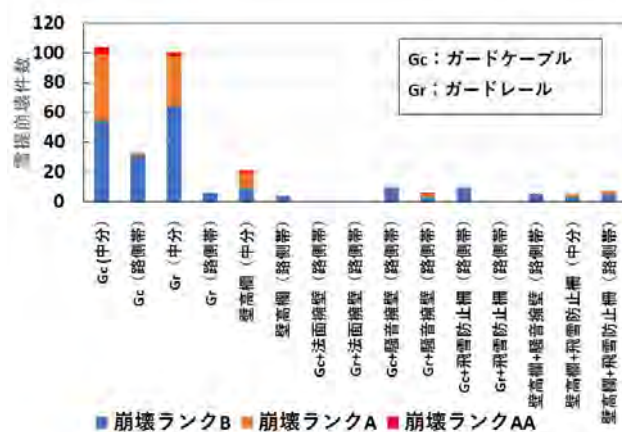


図2 2022/23 冬季の崩壊ランクごとに分類した構造物種別ごとの崩壊件数

また、図3のグラフでは、土樽PA～六日町IC間の崩壊は1月中に多発しており、その後1月下旬以降はほとんど崩壊が発生していない。崩壊件数が多い所では主に2つの傾向が読み取れ、日平均気温が氷点下で積雪深が急激に上昇しているタイミングや、日平均気温が0℃以上で積雪深が減少しているタイミングであることが分かる。次に崩壊件数の棒グラフに着目すると、ランクAAの崩壊が発生しているときは積雪深が100cmを越えているのが分かる。また、ランクAAの崩壊は大雪及び雪崩注意報・警報が同時に出ているときに発生していることがわかった。

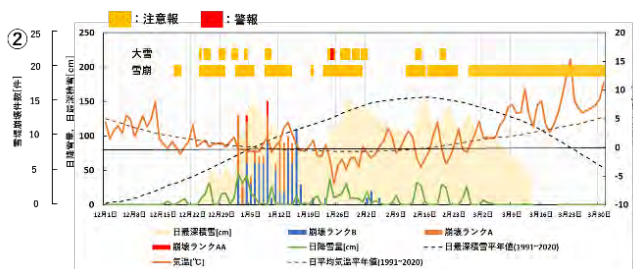


図3 2022/23 冬季の土樽PA～六日町IC間の雪堤崩壊件数と気象の関係

3. 分析方法

図3により、雪堤の崩壊の危険度評価を行う上で崩壊発生前の日平均気温、日降雪量、日最深積雪などの気象データが重要であると考え、分析では、河島・伊豫部²⁾(2021)の大雪による車両滞留の危険度評価システムを参考にした。2022/23 冬季の各崩壊事例について、崩壊日時から遡って1週間前を分析開始点とし、積算日平均気温、積算日降雪量、日最深積雪の3つの気象指標について雪堤崩壊との関係についてグラフを作成し、危険度評価に最適な気象指標を検討した(図4)。

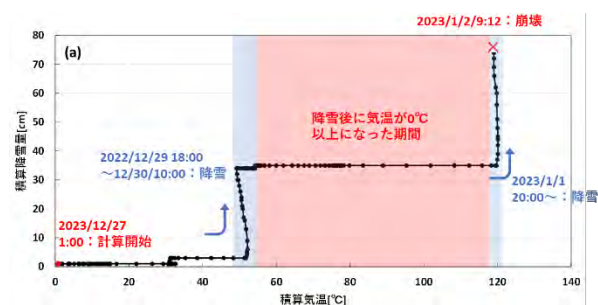


図4 1時間ごとの積算気温、積算降雪量、積雪深の推移(土樽PA～六日町IC間)

図4で示した積算グラフから一時間ごとの積算気温、自然積雪深の2つの気象指標を用いた分析は雪堤の危険度を評価するうえで有効であることがわかった。また、2022/23 冬季において初めて観測された雪堤崩壊は、3日前の降雪に

よる積雪深の増加が起点となって生じたと考えた。そこで崩壊までの傾向をより見やすくするため、分析開始点を1週間前から3日前に変更した。例として、湯沢区間(土樽PA～六日町IC間)で発生したすべての雪堤崩壊を対象に作成した積算グラフをまとめたものの例を図5に示す。それぞれの崩壊時点でのパラメータにはばらつきがあるが、プロットが集中している箇所がいくつか見受けられた。このグラフから崩壊が多発する傾向は主に2つ見て取ることができる。それらは①積算気温が0℃以下～50℃付近で、自然積雪深が80cmあたりを越えたとき、②自然積雪深が80cmに満たなくても、積算気温が100℃あたりを越えてきたときである。

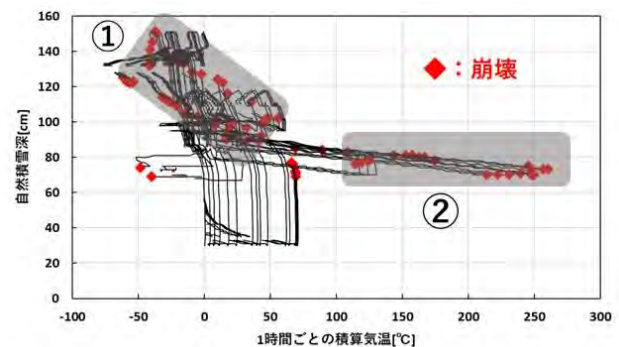


図5 土樽PA～六日町IC間での1時間ごとの積算気温、自然積雪深の推移(期間3日)

4. 積雪重量の検討

図5より、崩壊時点のプロットは積算気温が0℃付近のときには自然積雪深は高く、そこから積算気温が上昇するにつれて自然積雪深は減少傾向を示した。ここで積算気温が低い所では積雪の密度は低く、積算気温が高い所では積雪の密度は高いと考えられるため、それぞれの崩壊が起きたときの積雪重量には差がないと考えた。そこで、それぞれの崩壊時点での積雪重量を求めるため、2つの計算方法を利用して算出を試みた。

まず、1つ目の算出方法について述べる。積雪の全層平均密度を ρ [kg/m³]、自然積雪深を h [m]と置くと、積雪重量 M [kg/m²]は

$$M = \rho h \quad (1)$$

となる。なお、全層平均密度 ρ [kg/m³]は2通りの関係式を用いて算出した。まず、1つ目は上村ら³⁾による積雪の全層平均密度を積雪期の根雪開始時刻をゼロとする連続時間の関数として

$$\rho(t) = 0.08t + 160 \quad (2)$$

と一次近似したものである。2022/23 冬季では、2022/12/15を開始時刻とした。2つ目は松下ら⁴⁾による積雪の断面観測によって得られた経験式である。この式は、全層平均密度 ρ

[kg/m³]を目的変数, 全層平均雪温[°C]と積雪深[cm]を説明変数として重回帰分析を行うものである。

$$\rho = 10.50\sqrt{H} + 29.74T + 240.5 \quad (3)$$

ここで, 全層平均雪温 T [°C]は観測値が得られないため, $T=-1, -2$ [°C]と仮定した。

次に, 2 つ目の算出方法について述べる。積雪重量は次式で示す上村ら³⁾による関係式を用いて算出した。

$$M_n = M_{n-1} + bP_n - aT_n - r_n \quad (M_n \geq 0) \quad (4)$$

ここで, M_n は n 日目の積雪重量[kg/m²], P_n はその日の日降水量[kg/m²d], T_n は日平均気温[°C], a は融雪係数[kg/(m²d°C)], b は降水中の氷分率($0 \leq b \leq 1$)である。また, 土樽PA～六日町IC間の雪堤崩壊について, 図4で示した積算グラフの縦軸を積雪重量に変更し, 分析を行った。式(1)及び式(2)より算出した積雪重量を用いた結果を図6に示す。図より, 積雪重量は150～300 kg/m²付近まで幅広く分布しており, ばらつきが大きいことが分かる。また, 積算気温が上昇するにつれて積雪重量が減少し, 図5で示した結果と同様な傾向を示した。

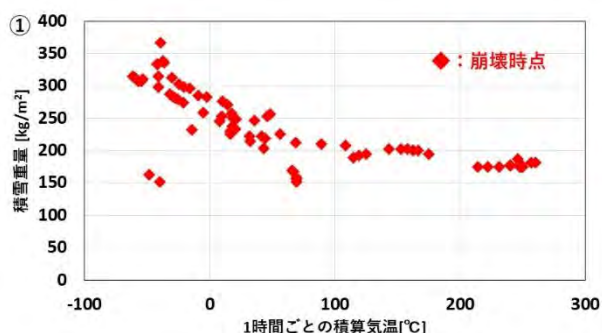


図6 式(1)及び式(2)より算出した積雪重量
(土樽PA～六日町IC間)

次に式(1)及び式(3)を用いた結果を図7に示す。全層平均雪温 $T=-1$ [°C]と仮定したときを①, $T=-2$ [°C]と仮定したときを②に示す。①では, 積雪重量が150～350 kg/m²付近まで分布しており, ②では, 積雪重量が130～360 kg/m²付近まで分布していた。また, 図6の結果と同様, ばらつきが大きい結果となった。

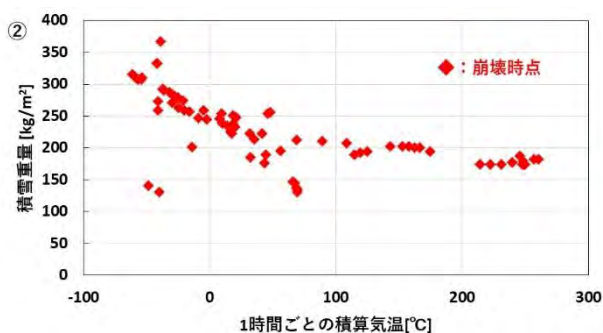
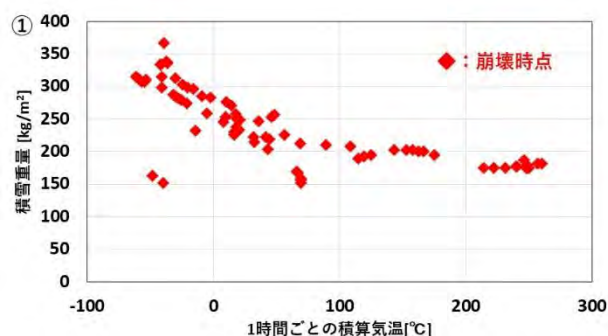


図7 式(1)及び式(3)より算出した積雪重量
(土樽PA～六日町IC間)

次に式(4)を用いた結果を図8に示す。図より, 積雪重量は170～350 kg/m²付近まで幅広く分布している。しかし, プロットのほとんどは積雪重量が300～350 kg/m²の間にある。この範囲外のプロットに着目すると, これらの崩壊は2024年1月2日から1月5日の間に発生したものであり, この期間は今冬において日降雪量が特に多かった期間である。従って, 雪堤崩壊は降雪中もしくはその前後に生じ, そのときの積雪重量は170～350 kg/m²付近まで幅広く分布しているといえる。また, 降雪が止み, 融雪期間の雪堤崩壊は, 「積雪重量が300～350 kg/m²のときに発生しやすい」と予測できる可能性がある。

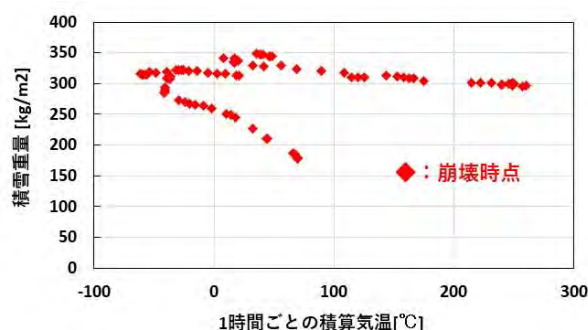


図8 式(4)より算出した積雪重量
(土樽PA～六日町IC間)

図 6 及び図 7 の結果より、式(1)を用いて算出した積雪重量は値のばらつきが大きい結果となった。これは式に用いている自然積雪深 $h[\text{cm}]$ が要因であると考えられる。自然積雪深のデータはアメダスから入手しているため、局地的な降雪の量は表現できない。実際に形成されている雪堤の高さとはある程度の誤差があると考えられるため、積雪重量にも誤差が出たと考えられる。一方、式(4)に用いる気象データは日降水量 $[\text{kg}/\text{m}^2]$ 及び日平均気温 $[\text{°C}]$ であるため、誤差が生じにくいと考えられる。このことから、本研究では、積雪重量を算出するには式(4)を用いてよいと判断した。また、積雪重量は雪堤崩壊の危険度の評価するうえで非常に有効なパラメータである可能性があることが明らかになった。

5. まとめ

本研究では、2022/23 冬季に関越自動車道(水上 IC～小千谷 IC)で発生した雪堤崩壊を分析し、その結果を基に、「雪堤の崩壊危険度を評価する気象指標を検討すること」、そして、「検討した気象指標を基に、ある時刻における雪堤崩壊の危険度を判断できる閾値、範囲の提案をすること」を目的とした。そこで、雪堤の崩壊危険度を評価するため、本報告では積算気温、積算降雪量、積雪深の 3 つの気象指標を検討した。その結果、これらは雪堤の崩壊危険度を評価するうえで有効であることがわかった。さらに、積雪重量を用いた雪堤崩壊危険度の評価を試みた。積雪重量の評価は上村ら³⁾の改正デグリーデイ(degree-day)法を用いるとよいと判断した。その結果、雪堤崩壊は降雪中もしくはその前後に生じ、降雪が止み、融雪期間の雪堤崩壊は、「積雪重量が $300\sim 350 \text{ kg}/\text{m}^2$ のときに発生しやすい」と予測できる可能性があることが示唆された。

文献

1. 芝崎ら(2021):道路雪堤の崩壊メカニズムの解明に向け基礎研究. 雪氷研究大会講演要旨集(2021・千葉オンライン), 49.
2. 河島・伊豫部, (2021):大雪による車両滞留の危険度評価システムの開発と試験的運用. 雪氷研究大会講演要旨集(2021・千葉オンライン), 62.
3. 上村ら(2021):遠赤外線融雪面の積雪深推計モデルと最適運動条件, 日本雪氷学会誌, 83 巻 4 号, 385~401 頁.
4. 松下ら(2016):積雪の全層平均密度と雪温および積雪深との関係, 雪氷研究大会講演要旨集(2016・名古屋), 1~32.