

# 高速道路における雪堤の形成と崩壊の過程に関する研究

鶴見 竜也<sup>\*1</sup>, 杉原 幸信<sup>\*2</sup>, 上村 靖司<sup>\*2</sup>, 町田 敬<sup>\*3</sup>, 河田 剛毅<sup>\*4</sup>

## 1. はじめに

新潟県の高速道路をご利用いただくお客様に、安全・安心・快適・便利な高速道路空間を提供するため、冬季期間中の積雪に伴う道路の除雪作業が不可欠である。除雪作業が繰り返されると、その間の自然積雪も加わって道路の路肩や中央分離帯に雪の山が形成される。これが雪堤である。堆積・成長した雪堤は思いがけず崩壊することがあり、道路側に崩壊するとお客様の自動車への物損被害を起したり、車線を塞いで通行の妨げになることがある。高速道路の中央分離帯で、交通に支障が出る規模の崩壊現象が発生した実例を図1に示す。図1 (A) は関越自動車道のガードケーブル地点、図1 (B) は磐越自動車道のワイヤロープ地点である。特に高速道路の性質上、自動車の走行速度が高く、雪堤崩壊による交通障害や事故が深刻化する可能性が高いことから、適切なタイミングで効率良く雪堤を処理することが求められている。しかし、雪堤処理のタイミングや方法は熟練した作業員の経験則に依存しているのが現状であり<sup>1)</sup>、さらに、大雪の際には雪堤の処理費用もかさむ。そのため、雪堤崩壊のメカニズムを解明し、その知見を踏まえて雪堤処理を効果的かつ効率的に行う手法の開発が期待されている。

本報告では雪堤崩壊メカニズムの解明を目的に、実際に形成された雪堤の断面観察を行い内部の層構造を調査した。それらの調査結果を踏まえて立案した崩壊メカニズムの仮説について報告する。

## 2. 道路雪堤の内部層構造

雪堤の内部状態を詳細に把握するため、2021年2月1日、2月26日、3月3日の計3日間に、高速道路に形成された雪堤のうち5箇所を図2のように掘削して断面を露出させ、一定の高さ間隔で物性値を測定した。測定項目は、密度、硬度、含水率、雪温、雪質、粒径に加え、凍結防止剤散布の影響度調査のための塩分濃度を含めた全7種とした。密度測定には角型密度サンプラー、硬度測定にはプッシュプルゲージ、含水率測定にはデノース式含水率計または遠藤式含水率計、雪温測定にはサーミスタ温度計、雪質や粒径には粒度ゲージ、塩分濃度には屈折率方式の塩分濃度計を用いた。観測地点の詳細を表1に示す。

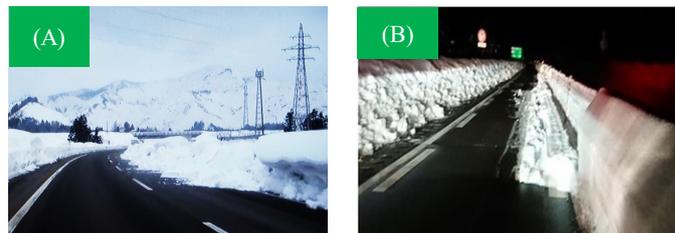


図1 高速道路の雪堤崩壊の例



図2 層構造調査における掘削作業の様子

表1 内部層構造調査における各観測地点の詳細 ①

番号	地点の名称	構造種別
a	中央分離帯 200.2Kp 付近	ガードケーブル
b	中央分離帯 201.7Kp 付近	ガードレール
c	中央分離帯 202.3Kp 付近	なし
d	路肩 192.2Kp 付近	ガードケーブル
e	路肩 220.9Kp 付近	ガードレール

表1 内部層構造調査における各観測地点の詳細 ②

番号	観測日時	気温[°C]
a	2021年2月1日(月) 11:30	-
b	2021年3月3日(水) 13:00	3.7
c	2021年3月3日(水) 10:30	10.3
d	2021年2月1日(月) 13:30	0.4
e	2021年2月26日(金) 13:00	4.3

### 2.1. 雪堤の層構造の特徴

まず、中央分離帯地点について述べる。2020年12月18日の事前調査で、積雪初期にも関わらず構造物周辺の積雪がほとんど存在せず空洞になっていることが確認されていた(図3)。それから2~3ヶ月後の本調査でも、積雪で覆われているガードケーブル、ガードレール内部や近傍の雪堤(特に雪堤下部)に共通して大きな空洞が存在した(図4)。そして、空洞内の表面は凍結状態となっており、特に構造物近傍で顕著であった(図5)。ガードレールを有する地点のうち車線から距離が離れていて除雪の影響が無視できる地点でも、小規模であるが同様の現象が見られた。従って、積雪初期に構造物の影響によってスカスカ(粗)の状

\*1(株)ネクスコ・エンジニアリング新潟 土木管理部土木管理課 (TEL: 025-244-8170)

\*2長岡技術科学大学 機械創造工学専攻

\*3町田建設(株)

\*4長岡工業高等専門学校 機械工学科



図3 粗の状態となっていた積雪初期の雪堤断面

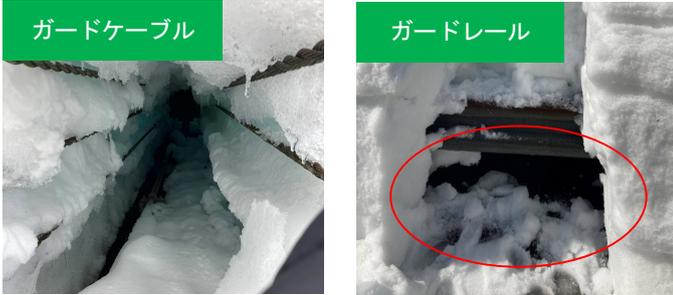


図4 雪堤内部に確認された大きな空洞



図5 氷状態の空洞表面

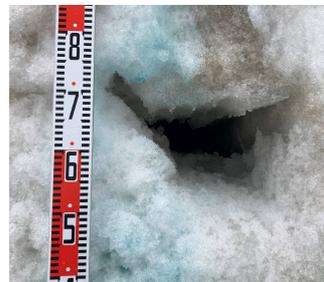


図6 路肩雪堤の空洞

態となった雪堤内部において、構造物を介した熱伝達やチャンネル融雪によって一部が融解し、その後再凍結することで大きな空洞に成長したと考えられる。

また、路肩でも空洞が確認された地点が存在した(図6)。この空洞は地面からおよそ1600 mmの位置で構造物からは離れており、空洞内部の高さが約150 mm、奥行きが2 m 以上であった。除雪担当者のヒアリング結果から、この空洞は構造物由来のものではなく、ロータリ除雪車や建設機械を用いた拡幅除雪の際に発生した積雪積み上げのムラによるものだと考えられる。

## 2.2. 雪堤内の物性値の特徴

第一に密度について述べる。ここで、各測定地点における雪堤の断面図と密度プロファイルを図7に示す。自然積雪の場合は一般的に圧密によって上層部から下層部にかけて密度が上昇するが、下層部の密度が上層部の密度を下回る「逆転現象」が発生している箇所が、地点bと地点eで確認された。雪は密度が低いほど融解しやすいため、路面や自動車に由来する熱によって雪堤下層部の不安定化が促進されると考えられる。地点bのような中央分離帯地点では、ロータリ除雪による積み上げが行われていないものの、構造物の影響で下層部では雪が積もりにくく、かつ圧密過程が十分に進行していなかったことが原因と考えられる。また、

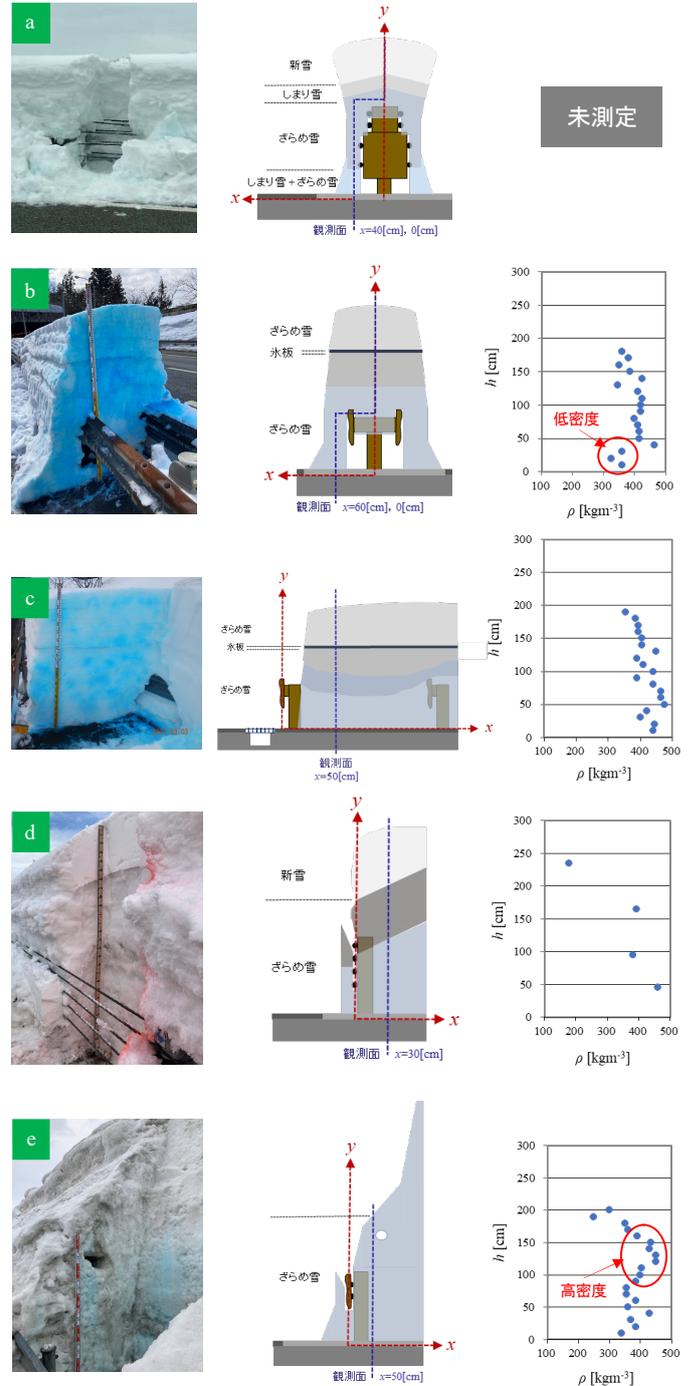


図7 雪堤の断面図と密度プロファイル ( $h$ : 高さ,  $\rho$ : 密度)

地点eのような路肩地点では、プラウを用いた新雪除雪によって路面上の雪が路肩側に流れることで堆雪する。その際、プラウの進行速度に応じてプラウの前方に塑性波が発生し、雪が圧縮される<sup>[2]</sup>。それに加えて、地点eは路外排雪のできないインターチェンジ区間であり、新雪除雪後に頻りにロータリ除雪による積み上げが行われていた。よって、新雪除雪や車両の走行によって圧縮された密度の高い雪が上層部に積み上げられたことが原因と考えられる。

第二に硬度について述べる。全体的に自然積雪と同様に下層部の方で硬度が高く、上層部にかけて硬度が低下する傾向を示していた。特に地点eではロータリ

除雪によって雪が繰り返しく高く積み上げられていたことから、他の地点より比較的硬度が高い傾向にあった。

第三に雪質・粒径について述べる。地点 a と地点 d では観測日前日に降雪したため雪堤最上部に「新雪」が堆雪していたが、全体的にほとんどが「ざらめ雪」で構成されており、堆雪期間の違いによる層の区別が目視でも可能だった。全地点における平均粒径は新雪部で約 0.5 mm、ざらめ雪部で約 2.2 mm であり、ざらめ雪部は最大で 3.0 mm となった。なお、中央分離帯と路肩を比較して構造物の配置位置の違いによる粒径に大差は見られなかった。

第四に塩分濃度について述べる。露出断面から一定の高さ間隔でサンプルを採取して持ち帰り、測定した結果、全ての試料でほぼ 0 %であった。サンプルの採取日が、路面への凍結防止剤の散布から時間が経っていたため、雪堤から塩分が流出した後であったと考えられる。なお、凍結防止剤 (NaCl) によって雪が弱化した報告<sup>3)</sup>もあるため、さらなる検討が必要である。

最後に、含水率と雪温については大きく特徴的な傾向が見られなかったため、ここでの説明は省略する。

### 2.3. 雪堤形状の三次元測定

雪堤の内部層構造の調査の際には、標尺を用いた二次元的な雪堤高さの測定に加えて、測量ソフトウェアを用いた三次元的な雪堤形状の測定も行った。測量ソフトウェアは PIX4D 社の PIX4D catch, PIX4D cloud を使用した。これは詳細な位置情報を付加した写真を複数枚撮影し、それらの写真を組み合わせることで三次元の点群データとして復元する仕組みである。写真の撮影は市販のスマートフォンでも可能であり、本測定には Apple 社の iPhone SE (2nd generation) を用いた。なお、測定の際に標尺を写し込み、測定精度が許容範囲内であることも確認した。

三次元点群データと現場の写真を照合しながら、雪堤の状態分析を試みた。雪堤の断面積をソフトウェアの機能を用いて算出し、その断面積や実測値から算出した平均密度から特定区間における雪堤の推定質量を求めた。また、中央分離帯地点に関しては構造物にかかる推定負荷も求めた。ここで、雪堤形状は構造物に対して左右対称、雪堤の断面積や密度は区間によらず一様、構造部へかかる負荷は構造物上部の積雪の質量のみと仮定して、図8に示す簡易モデルに置き換えた。

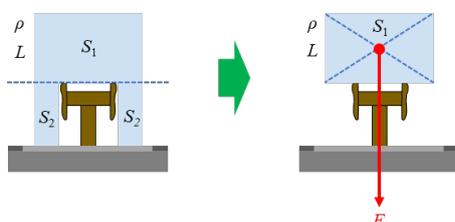


図8 雪堤断面の簡易モデル

構造物上部の雪堤断面積を  $S_1$ 、構造物側面・下部の雪堤断面積を  $S_2$ 、層全体における平均密度を  $\rho$ 、区間長さ (奥行き長さ) を  $L$  と置くと、特定区間における雪堤の推定質量  $M$  は

$$M = \rho L(S_1 + 2S_2)$$

となる。また、重力加速度を  $g$  と置くと、特定区間における構造部への推定負荷  $F$  は

$$F = \rho g L S_1$$

となる。それぞれの観測箇所における算出結果を表 2、表 3 に示す。区間長さは、表 2 では全て 1 m とした。表 3 では構造の違いを考慮して、関越自動車道におけるガードケーブルやガードレールの標準支柱間距離を適用し、1 支柱区間における値を算出した。ガードケーブルの標準支柱間距離は 7 m、ガードレールの標準支柱間距離は 4 m である。なお、地点 d に関してはデータを復元できなかったため省略した。また、中央分離帯の地点 c と路肩の地点 e は掘削部のみの断面積であり、実際には算出値以上の堆雪が存在している。まず、表 2 で中央分離帯の地点 b と路肩の地点 e の推定質量  $M$  を比較すると、質量比にして中央分離帯の 3 倍以上の雪が路肩側の方に堆雪していることが分かった。これは、新雪除雪によって雪が路肩側にかき集められ、ロータリ除雪によってさらに積み上げられたこ

表 2 算出した単位区間当たりの雪堤の推定質量

地点番号	a	b	c	e
$S_1$ [m <sup>2</sup> ]	1.1	1.4		
$S_1+2S_2$ [m <sup>2</sup> ]	2.1	2.1	3.1	6.5
$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	387.5 <sup>*1</sup>	392.8	419.5	379.3
$M$ [t]	0.8	0.8	1.3	2.5

※1: 地点 a は未測定であったため、同日に測定した地点 d の密度の平均値を使用した。

表 3 算出した 1 支柱区間における構造物への推定負荷

地点番号	a	b
$S_1$ [m <sup>2</sup> ]	1.1	1.4
$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	387.5 <sup>*1</sup>	392.8
$M_{S1}$ [t]	3.2	2.3
$F$ [kN] (kgf)	31.2 (3181.9)	22.0 (2246.9)



図9 不均一にたわんだガードケーブル (※左は点群データ)

とが影響していると考えられる。前項で述べた密度の逆転現象も含めて、堆雪量が多いと下層部にかかる負荷も大きくなるため、雪堤の不安定化に寄与している可能性が示唆される。

また、表3でガードケーブルの地点aとガードレールの地点bの推定負荷 $F$ を比較すると、荷重比にして約1.4倍の負荷がガードケーブルの方にかかっていることが分かった。これは、ガードレールよりもガードケーブルの方が長いという、構造種別による標準支柱間距離の違いが影響していると考えられる。それに加えて、図9に示すように構造上ガードケーブルは負荷に応じて自然たわみに加えて不均一にもたわむため、構造物直上の凍結した雪も不均一に支えられ融解していることが考えられる。雪堤全体の形状や高さは同一区間で均一と見なせることから、ケーブルのたわみを考慮して考えると、たわみ部の推定重量や推定負荷はさらに大きくなると推定される。従って、中央分離帯ではガードケーブルの方がより雪堤の不安定化に寄与している可能性が示唆される。

### 3. 雪堤崩壊メカニズムにおける仮説の立案

雪堤崩壊について観測結果を基に崩壊メカニズムの仮説を立案した。崩壊過程を表した図解を図10に示す。図解はガードレール中央分離帯に基づいて構成した。

第一に雪堤の形成段階では、構造物周辺を中心に①雪が積もりにくく粗の状態になること②圧密が進行しにくいことの2項目によって、雪堤下層部の密度が上層部の密度を下回る「逆転現象」が発生する。

第二に雪堤の融解段階では、気温や日射、地中熱、風などの自然的要因の熱量に加え、自動車の排気ガスや走行風などによる人工的要因の熱量によって、雪堤下層部から融解が進行する。この際、路面近くの供給熱量が特に多く雪堤脚部がやせ細り、上層部がせり出したオーバーハング形状の雪堤に変化する。また、構造物周囲の積雪の融解が進んでさらに空洞化する。それらと同時に、昼夜間の気温差に起因する融解・再凍結により、空洞内表面や構造物直上の積雪表面が凍結する。特に、構造物直上の氷塊は構造物上の積雪を支えて沈降を阻害する。これが不均一な融解・圧縮に繋がり、雪堤の不安定化を招くと考えられる。

第三に雪堤の不安定化促進段階では、オーバーハング部は片持ち梁のような支持状態となるため、その支持部である雪堤上層部・構造物端部にせん断力と曲げ力が働く。これらの作用により、クラックが発生・進行する。そして、クラックを境とした路面側の積雪が傾くことで、より大きなオーバーハング形状となる。

最後に、クラックが完全に離れることで支えがなくなり、雪堤崩壊に至ると考えられる。

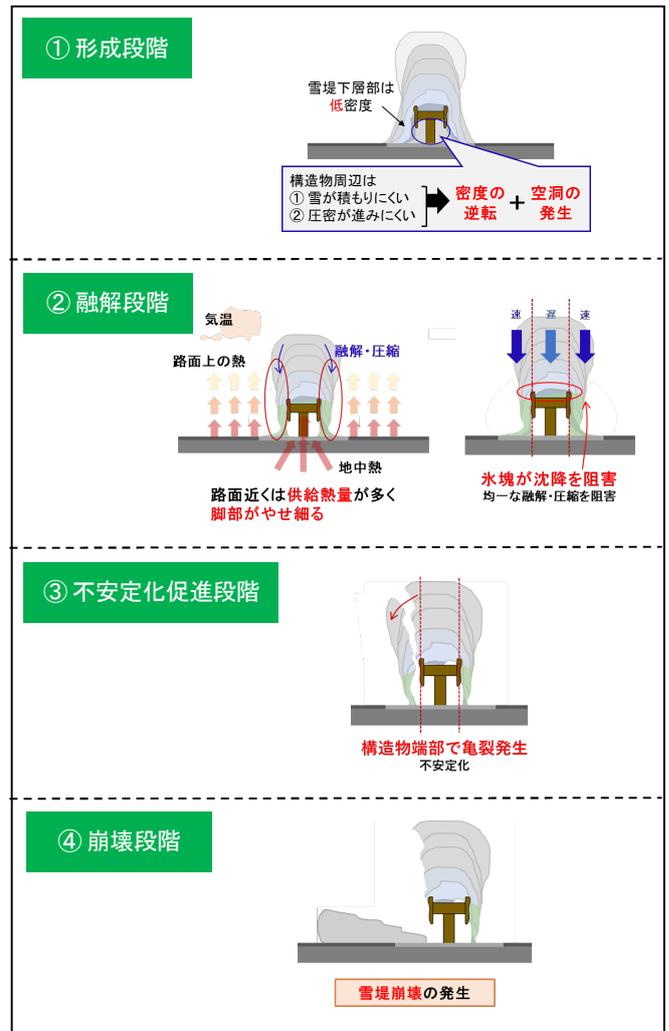


図10 雪堤崩壊メカニズムの仮説

### 4. おわりに

本研究では、雪堤内部の層構造を観察するとともに、密度・硬度等の物性値の測定や三次元測定を行い、雪堤がどのような状態で成り立っているのかを調査した。

今後は、立案した崩壊メカニズムの仮説の部分部分に焦点を当て、雪堤の模型を用いた実験的解析に加え、シミュレーションを用いた理論的解析によって仮説を詳細に検証していく予定である。

### 参考文献

- [1] 西ら, 2014: 雪堤切りアタッチメントによる中央分離帯雪堤処理の効率化. ゆき, 97, 86-89.
- [2] Andrew C. Hansen, 1991: Analysis of Energy Dissipation Caused by Snow Compaction During Displacement Plowing. Transportation Research Record, 1304, 177-181.
- [3] Johan Wahlin et al., 2014: The effect of sodium chloride solution on the hardness of compacted snow. Cold Regions Science and Technology, 102, 1-7.