

融雪等による道路斜面災害の調査・評価手法に関する研究（２）

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 26～平 29

担当チーム：寒地基礎技術研究グループ
（寒地地盤）

研究担当者：林憲裕、林宏親、山木正彦

【要旨】

北海道において平成 24 年 5 月と平成 25 年 4 月に国道 230 号で盛土崩壊が発生した。その後の調査により、崩壊の一因として融雪水の影響が明らかとなり、積雪寒冷地においては融雪水の影響を考慮した斜面の維持・管理の必要性が認識された。平成 26 年度は、北海道における盛土災害に関する近年の事例を収集し、発生の要因、発生時期に関して整理を行った。また、冬期、融雪期における盛土内の水位を把握するために、過去融雪期に変状が生じた盛土において、盛土内水位の観測を行った。平成 27 年度は、新たな現場を対象とし、融雪期の盛土変状メカニズムを解明すべく、すべり安定解析を実施した。

キーワード：盛土、融雪水、水位観測、安定解析

1. はじめに

積雪寒冷地である北海道の盛土災害に関しては、降雨や地震だけでなく融雪水の影響を無視することはできない。平成 24 年 5 月 4 日に国道 230 号（中山峠）で、道路延長約 40m の範囲で盛土法面が崩壊し（崩壊土砂は約 13,000m³）、地すべり兆候による路面変状も相まって 20 日間の全面通行止め、平成 25 年 4 月 7 日には同じく国道 230 号（薄別）で、道路延長約 50m に渡り盛土法面が崩壊し（崩壊土砂は約 11,000m³）、6 日間の全面通行止めに見舞われている。いずれの被災も融雪水が一因であることがその後の調査により指摘され、盛土を含む道路斜面の維持・管理、さらには対策にあたっては融雪水の影響を考慮する必要性が認識された。

他方、社会的影響が甚大であった近年の盛土被災に東名高速道路の被災がある。駿河湾地震（2009 年）により東名高速道路の牧之原 SA 付近の盛土で崩壊が生じたが、直接の原因（誘因）は地震動ではあるものの、地震時に盛土内水位が高かったこと、水の出入りによりスレーキングが生じ盛土材が細粒化していたことが主たる原因であると推定されている¹⁾。

盛土の被災には種々の原因が考えられるが、盛土内に存在する水がその一因であることは明白である。そのため、道路土工—盛土工指針²⁾においても、盛土は、盛土内に水が入りにくい構造、入った水の排水を促す構造、盛土内水位を上昇させない構造にすべきである、との記

載がある。一般に盛土の劣化を設計に考慮することはないが、先に述べた盛土材のスレーキングや、凍結融解を繰り返し受けることによる盛土材の強度・変形特性の変化³⁾⁴⁾、その他、凍土の形成による透水性の変化や気候変動にともなう降雨や融雪の増加など、水を起因とし想定される盛土の劣化や盛土災害に関して、そのメカニズムや対策法を解明・提案することは重要な意義があると考えられる。

本研究では、積雪寒冷地における盛土災害に着目し、特に融雪水が盛土に及ぼす影響に関して検討を行うものである。平成 26 年度は、北海道において平成 22 年から平成 24 年の 3 年間で発生した盛土の崩壊・変状に関する事例を収集し、整理するとともに、融雪など積雪寒冷地特有の誘因による盛土災害の発生機構を解明すべく、過去実際に融雪期に変状が生じた盛土において、盛土内水位の観測を行った。平成 27 年度は、平成 26 年度に調査した現場とは異なる現場（過去実際に融雪期に変状が生じた盛土）を対象とし、融雪期の盛土変状メカニズムを解明すべく実施したすべり安定解析結果を報告する。

2. 盛土災害に関する事例の整理

平成 22 年から平成 24 年の 3 年間で北海道における盛土災害に関して事例を収集し、整理した。事例の収集にあたっては、防災点検業務など災害当時に道路管理者

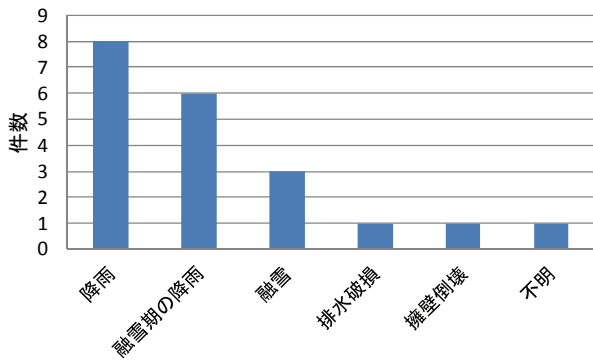


図1 盛土災害の誘因
(平成22年～24年の北海道において)

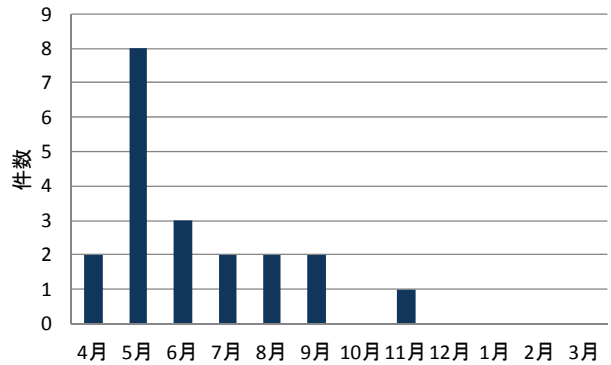


図2 盛土災害の発生時期
(平成22年～24年の北海道において)

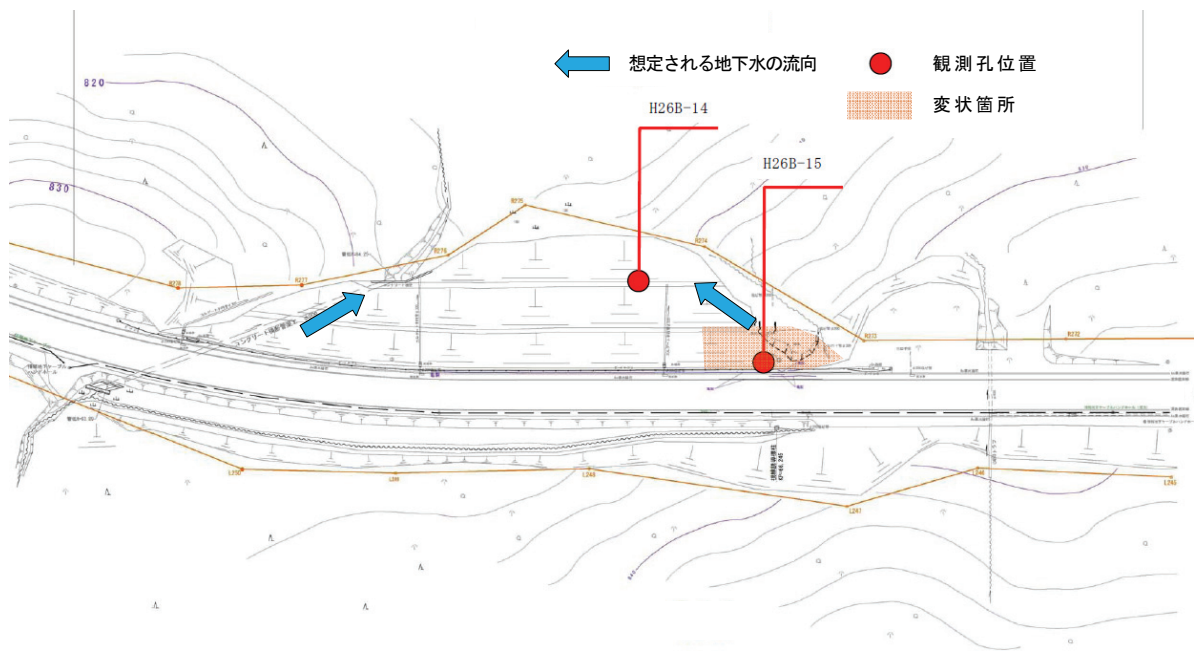


図3 当該盛土の状況および水位観測箇所 (平面図)

が対応したものを対象とした。

収集した結果、事例数は20件となった。災害の誘因別に件数で整理した結果が図1である。誘因としては、「降雨」によるものが8件、「融雪と降雨」によるものが6件、「融雪」が3件となったほか、排水施設の破損が1件と、水に関するものが全体の9割を占めた。次いで、盛土災害の発生時期について図2に整理した。先に示した通り、融雪を誘因とする災害が多いことに関連し、5月に災害件数が突出している。収集した事例は限られているが、北海道のような積雪寒冷地においては、融雪期の盛土災害に対する技術的検討の重要性が改めて確認された。

3. 盛土内水位観測 (現場1)

3.1 概要

盛土内に浸入した水 (降雨・融雪水等) が盛土の安定

に影響を及ぼすことは自明であるが、実際に盛土 (特に道路盛土) 内の水位を計測した事例は限られている。融雪期における盛土災害のメカニズムの究明や、対策工を提案するに当たって、盛土内の水位等を把握することは重要であると考え。ここでは、過去融雪期に変状が生じた道路盛土に対して実施した盛土内水位観測の結果を紹介する。

当該盛土は切り盛り境に位置する片盛土であり、平成26年4月に、盛土法面の変状および路面クラックが確認された。変状箇所における盛土高さは5m、勾配は1:1.5であり、被災当時は全体が湿地状で、法尻には湧水があり、また山側背後斜面には残雪があった。なお盛土材はシルト質砂礫に分類される。以上のような災害時の状況と、その後のボーリング調査等により、盛土内への融雪水の浸入が変状の一因と推察された。

当該箇所の平面図を図3に示す。図中の矢印は、旧地

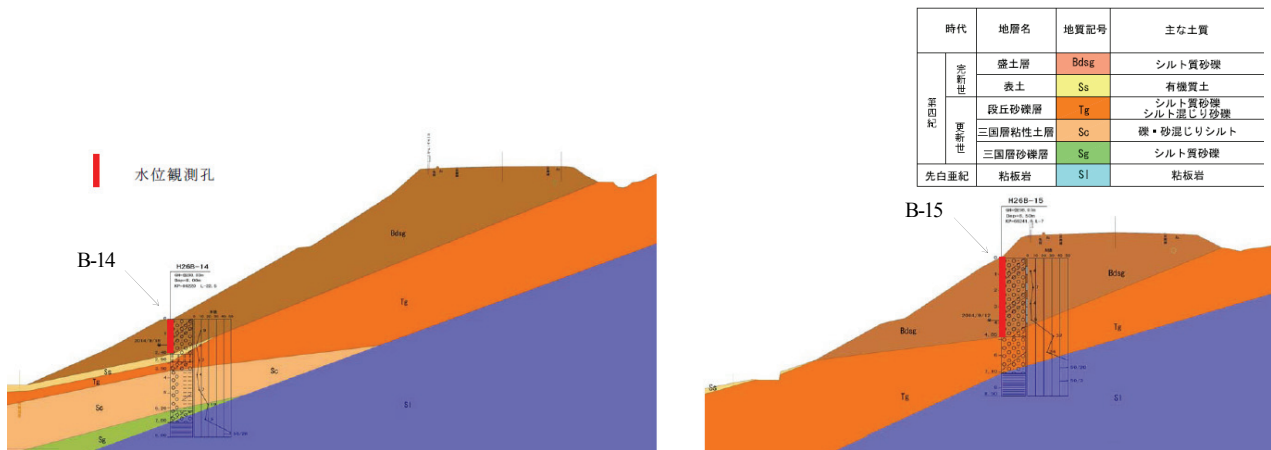


図4 盛土断面および水位観測箇所

形から想定される地下水の流向である。盛土内水位観測孔は盛土法面の変状箇所 (B-15) と盛土法面谷側 (B-14) の2箇所で行った。図3と併せて図4を参照されたい。

次いで、盛土内水位観測孔について説明する。水位観測はボーリング箇所を利用して行われた。今回、あくまで盛土の変状に直接的に影響を及ぼす盛土内の水位を観測したかったため、既存のボーリング孔において地山部を埋め戻した上、ベントナイトペレット等のシール材により遮水し、地山部を完全に閉塞した後、その上部において盛土内水位観測孔を設置している。これは、融雪水のように短期間である程度の水量が盛土や地山に流入することを考えると、盛土と地山の透水性の違いにより、地下水位が盛土と地山それぞれに形成されることが想定されるためである。盛土内水位観測孔の構造概要を図5に示す。なおB-14の孔底は地表面から深度2.4m、B-15の孔底は地表面から深度4.85mである。

盛土内水位の観測にあたっては、水圧式水位計を使用した。観測は水位面から受圧部 (各孔底) までの深さを1時間毎に測定している。

3.2 観測結果

B-14とB-15において観測された盛土内水位を図6に示す。図には、現地から最も近いアメダスから得られた、降水量と積雪深のデータも参考に記載している。なお、図6(a)は地表面から水面までの深さで、図6(b)は孔底(地山)から水面までの高さで示している。

図より、観測箇所(標高)が異なり、また観測点における盛土厚さも異なるため、水位は一致しないものの、積雪期においてB-14とB-15の水位挙動は同じ傾向を示している。図6(b)に記している通り、両水位観測孔において、2015年3月10日に水位が低いポイントがあり、それ以降1カ月ほどで水位が60cm程上昇していることが確認できる。観測期間全体で見ると、この時期に特段

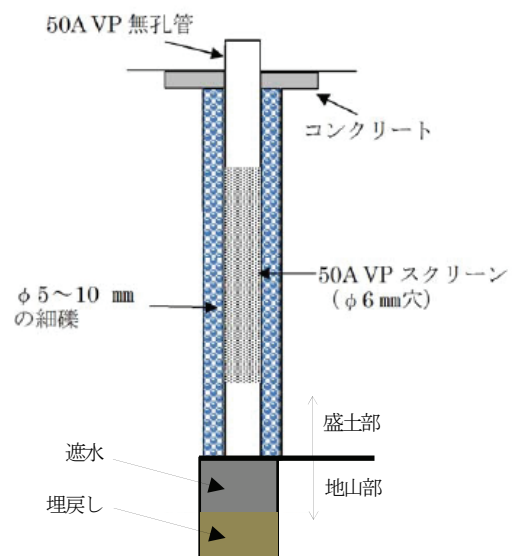


図5 盛土内水位観測孔

水位が高い訳ではないが、融雪期には、それ以前と比べて相対的かつ短期間に盛土内水位が高くなることが確認された。

先に、異なる観測箇所にもかかわらず、水位挙動が同傾向を示していると述べたが、当初は水の流入源に近い山側(B-15)の水位変動に追従して谷側(B-14)の水位が変動する(水位変動に時間差が生じる)と思われた。現段階では、水位挙動が同傾向を示している理由は不明であるが、山側から流入する水および盛土法面から流入する水と法尻から流出する水の量のバランスによりこのような結果が生じたものと考えられる。盛土内に存在する水の挙動は本研究において重要な要素であるため、今後浸透流解析等により盛土内における水の流入・流出に関して詳細な検討を進めたい。

次いで、盛土の厚さが形成される盛土内水位に及ぼす影響を見るために、図7に、観測された水位(図6(b))を盛土厚さで正規化した結果を整理した。図より、盛土

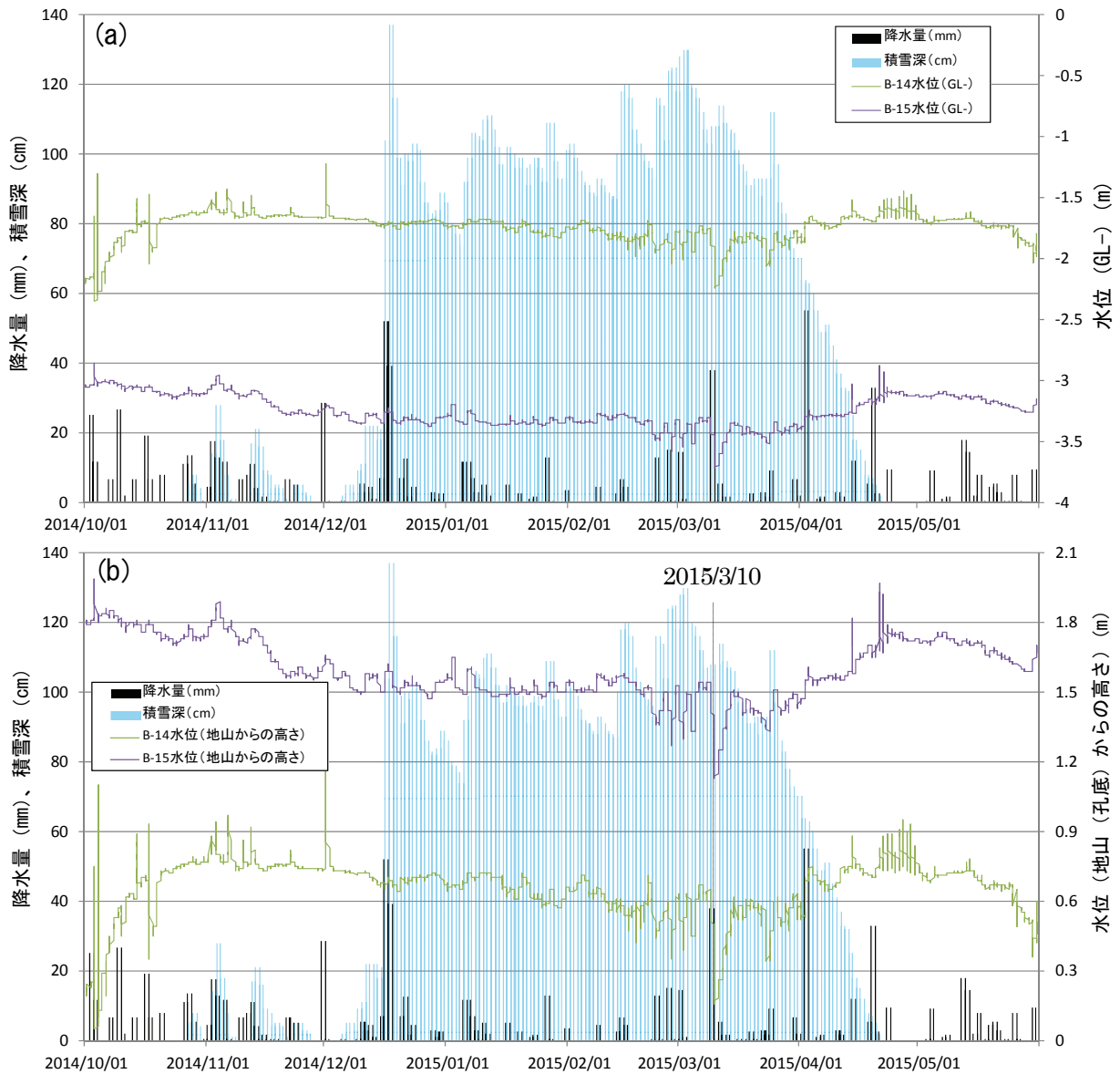


図6 盛土内水位観測結果

(a) GL- (m)、(b) 地山 (孔底) からの高さ (m)

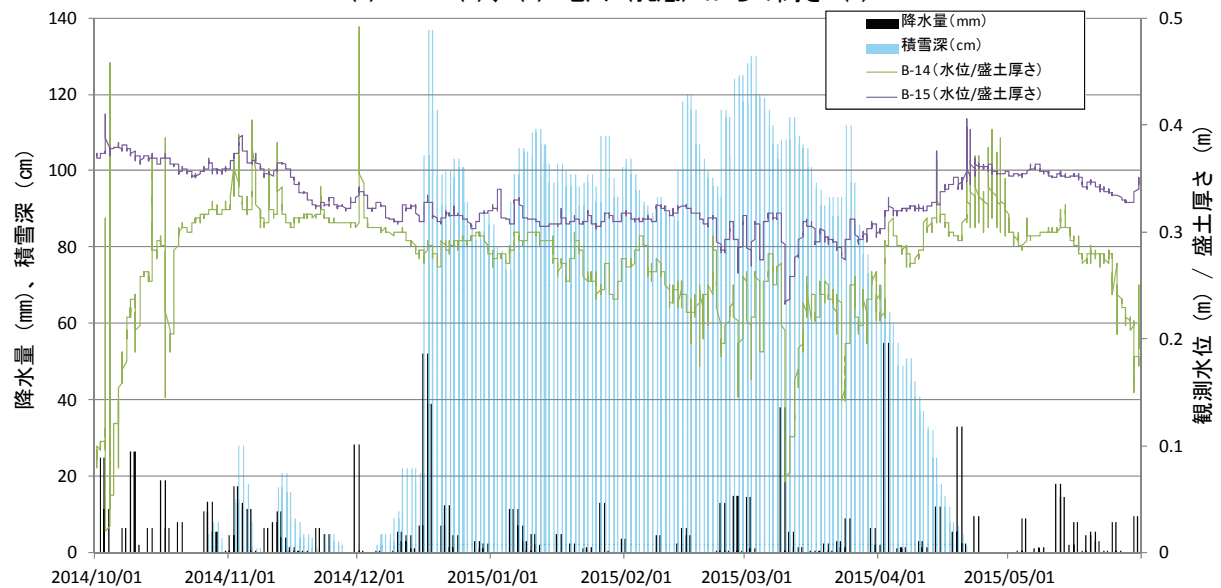


図7 盛土厚さで正規化した観測水位 (単位はともにm)

厚さが厚いB-15の方が全体的に高い数値を示しており、積雪期に関してはその差がある程度一定に見受けられる。

本結果は本調査のみの限られたものであり、地山の透水性や盛土と地山の透水性の差などによりその傾向は異なることは考えられるものの、ある箇所の水位観測により、その他の箇所の盛土内水位を推定できる可能性を示唆している。

4. 融雪期における盛土の安定性検討（現場2）

4.1 概要

当該現場は平成25年4月に路面に亀裂が確認された道路盛土（片盛土）である。変状確認後の現地調査において得られた平面図を図8に、断面図を図9に示す。

原因調査により、地質的素因として、道路盛土直下に背後斜面から供給された透水性の良い粗粒土と不透水性の粘性土の薄層からなる非常にルーズな二次堆積物（崖錐堆積物；dt）が分布し、地下水が浸透し易い条件下にあったこと、地形的素因として、背後に谷斜面を有し、融雪に伴う表流水や地下水が集中しやすい箇所であったことが挙げられている。

変状発生前2日間の連続雨量は11mmであったが、積雪深の減少が19cm（雨量換算95mm）と大きく、変状発

生直後の点検でも山側側溝が滞水していたとの報告があった。そのため変状の誘因としては、降雨と急激な融雪で山側側溝の排水が盛土直下の崖錐堆積物中に浸透し、地下水上昇に伴ってせん断強度が低下したことによる地盤の緩みと推定されている。

なお、地質図や地形図から当該区間には深い地すべりの分布が想定されるが、今回の路面変状が側溝～盛土小段1段目に限定的であることから、変状要因として地すべりと直接的な関係は無いものと判断されている。

以下に、当該現場を対象とし、融雪期の盛土災害のメカニズムを検討すべく実施した、すべり安定解析について述べる。

4.1 盛土材の物理・力学特性

盛土材は盛土のり肩付近（図8、9参照）で乱した試料（攪乱試料）を採取した。併せて同箇所でもトリプルサンプリングを行い、盛土の原位置密度を把握している。トリプルサンプリングおよび物理・力学試験は地盤工学会基準⁵⁾⁶⁾に従っている。なお力学試験は圧密排水三軸圧縮（CD）試験とし、原位置の乾燥密度（ $1.524\text{g}/\text{cm}^3$ ：締固め度 D_c で88%）で供試体を作製した後、飽和させ、有効拘束圧20kPa、50kPa、100kPaの条件下で得られたモールの応力円より強度定数（粘着力 c_d および内部摩擦角

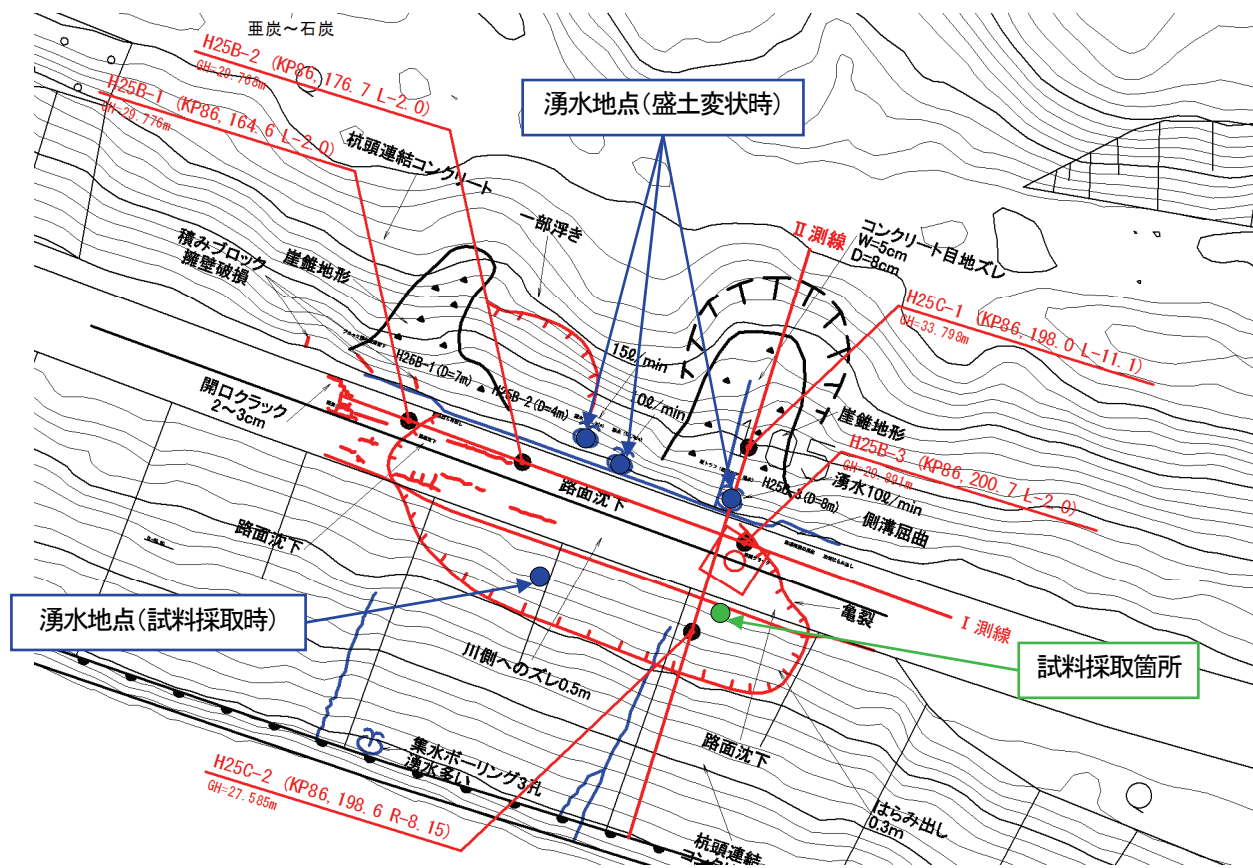


図8 すべり安定解析の対象とする現場平面図

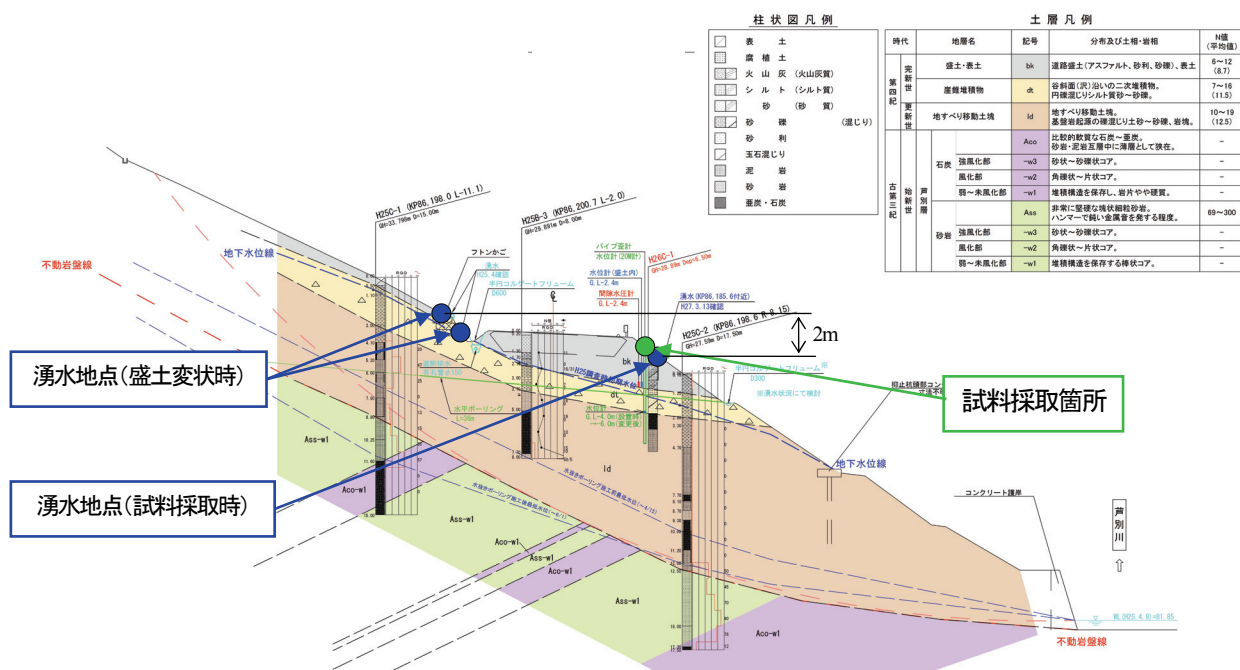


図9 すべり安定解析の対象とする現場断面図

表1 盛土材の物理・力学特性

土粒子密度, ρ_s (g/cm ³)	自然含水比, w_n (%)	原位置密度		粒度		塑性指数, I_p	締固め特性 (A-c法)		強度定数 ($D_c=88\%$ 時)	
		湿潤密度, ρ_t (g/cm ³)	乾燥密度, ρ_d (g/cm ³)	細粒分含有率, F_c (%)	50%粒径, D_{50} (mm)		最大乾燥密度, ρ_{dmax} (g/cm ³)	最適含水比, w_{opt} (%)	粘着力, c_d (kN/m ²)	内部摩擦角, ϕ_d (°)
2.558	17.6	1.795	1.524	36.9	0.181	13.7	1.728	16.6	7.1	31.1

ϕ_d) を得ている。物理・力学特性の一覧を表1に示す。

盛土材は礫混じり砂質シルトに分類される。試料を採取した3月では、サンプリング孔からは盛土内に水位は確認されず、自然含水比は最適含水比よりわずかに高い程度であった。

一連の試験結果により、後述するすべり安定解析に用いる盛土の土質定数は湿潤重量 $\gamma_t = 18.0 \text{ kN/m}^3$ 、飽和重量 $\gamma_{sat} = 19.3 \text{ kN/m}^3$ (土粒子密度と間隙比より算出)、内部摩擦角 $\phi = 31^\circ$ 、粘着力 $c = 7.0 \text{ kN/m}^2$ とした(表2)。

4.3 すべり安定解析

4.3.1 解析手法

盛土のすべり安定性を検討する手法としては、円弧すべり解析が一般的かつ簡易な手法といえる。ここでは、盛土内への融雪水の浸入を想定した検討を行うため、円弧すべり解析の中でも、水圧(水位)を考慮した円弧すべり解析に着目する。この解析手法(以下、本解析手法とする)は、通常、地震時の過剰間隙水圧の発生を考慮した円弧すべり面を仮定した安定解析手法⁷⁾であるが、寒冷地における冬期もしくは融雪期では、盛土のり面等に存在する雪氷や凍土により、通常の排水が行われない可能性があり、盛土内に過剰間隙水圧が生じることが想定される⁸⁾。その水圧を融雪期の過剰間隙水圧とし、適用を試みる。

表2 盛土の土質定数

単位体積重量		強度定数	
湿潤重量, γ_t (kN/m ³)	飽和重量, γ_{sat} (kN/m ³)	粘着力, c (kN/m ²)	内部摩擦角, ϕ (°)
18.0	19.3	7.0	31.0

式(1)に本解析手法の安全率算出方法を示す。式(1)中の Δu は通常、地震動によって発生する過剰間隙水圧を表すが、ここでは地震動に限らず融雪期に生じる盛土内の過剰間隙水圧とする。

$$F_s = \frac{\sum(c \cdot l + (W - u_0 \cdot b - \Delta u \cdot b) \cos \alpha \cdot \tan \phi)}{\sum W \cdot \sin \alpha} \dots (1)$$

ここで、

F_s : 安全率

c, ϕ : 土の粘着力 (kN/m²) および内部摩擦角 (°)

W : 分割細片の全重量 (kN/m)

l : 細片底面の長さ (m)

b : 細片の幅 (m)

u_0 : 常時の地下水位による間隙水圧 (kN/m²)

Δu : 融雪期の過剰間隙水圧 (kN/m²)

α : 分割細片底面の接線方向と水平面のなす角 (°)

併せて参考として図10を示す。

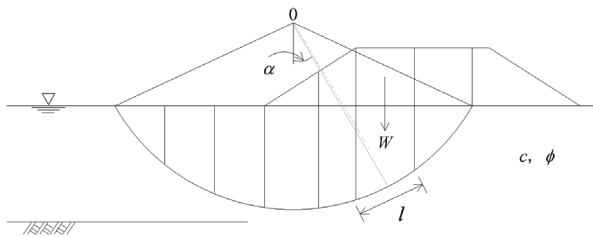


図10 本解析手法の参考図

なお、設定した盛土の土質定数は表2の通りである。

4.3.2 現況断面（融雪期）におけるすべり安定解析

先に述べた通り、トリプルサンプリングによる試料採取を行った時点で、サンプリング孔では盛土内に水位が確認されなかったため、その近傍の盛土のり面で確認された湧水地点（図8、9参照）を初期水位面と仮定し、検討を行った。なおここでは、水圧としては式(1)における Δu は0であり初期水位（水圧）として u_0 のみ作用している条件である。

図11に示す通り、解析の結果、現況のすべり安全率 $F_s=1.433$ となり、 $F_s \geq 1.2$ （道路土工—盛土工指針²⁾）を満足しており、現況断面での盛土の安定性は確保されている状態であると判断できる。つまり今回湧水地点から仮定した融雪期における水位においては、盛土に変状は生じないという結果となった。しかし、現実に過去、対象とした盛土で変状が生じている事実があるため、盛土内には与条件以外に何らかの作用が働いていると考えることが自然である。

以上を踏まえ、以下に、盛土内に過剰間隙水圧が生じたものと仮定して行った本解析手法による結果を示す。

4.3.3 盛土変状時を想定したすべり安定解析

盛土内の間隙水圧が上昇することで、せん断強度が低下し、すべり安全率 F_s が低減する。それを評価するため、先述した現況水位に対し任意の過剰間隙水圧を作用させた場合の盛土のすべり安定性を検討した。この場合の盛土の状態としては、水位は先と同じ湧水地点をもとに設定してはいるが、湧水は生じておらず、盛土内の排水（水圧の消散）が十分には行われていない状態といえる。

なお、本解析手法による安定解析を行うにあたって、計算の必要性から、過剰間隙水圧 Δu を有効土被り厚 σ_v で正規化した過剰間隙水圧比を算出している。

図12に、過剰間隙水圧比をパラメータに実施した解析結果を示す。横軸に過剰間隙水圧 Δu 、縦軸は盛土のすべり安全率 F_s で整理している。図より、盛土内の過剰間隙水圧の上昇とともにすべり安全率が減少し、その過剰間隙水圧 Δu が 20kN/m^2 程度作用すると、盛土のすべり安全率 F_s が1.0となる。

盛土変状時に確認されている地山の湧水地点と、試料

最小安全率	$F_{s \min}$	=	1.433
円弧の中心	X	=	9.27 (m)
	Y	=	31.31 (m)
半径	R	=	5.42 (m)
抵抗モーメント	M_R	=	506.8 (kN・m)
起動モーメント	M_D	=	353.8 (kN・m)

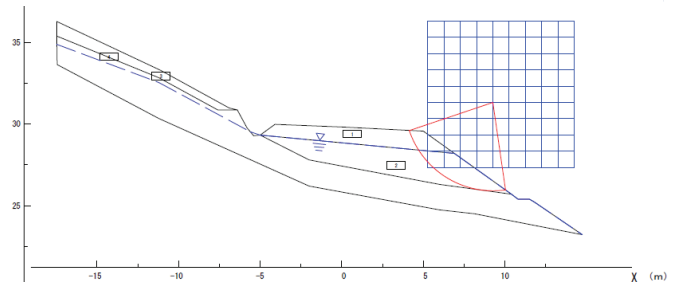


図11 初期水位を仮定した断面における解析結果

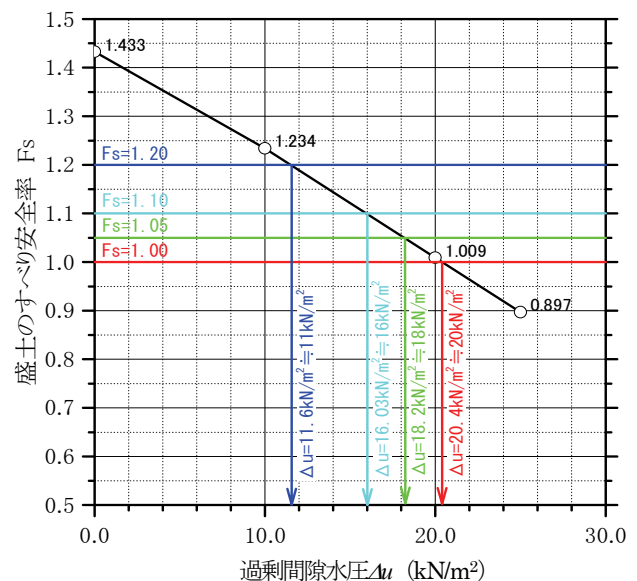


図12 盛土内の過剰間隙水圧とすべり安全率の関係

採取時の湧水地点との水頭差は最大2m程度（図9参照）である。これは水圧で 20kN/m^2 に相当する。つまり、盛土変状時には $\Delta u=20\text{kN/m}^2$ 程度の過剰間隙水圧が盛土内に作用しており、盛土が不安定な状態であった可能性が考えられる。

以上は、既存の解析手法を適用し、融雪期の盛土災害のメカニズムに関して一考察を行ったものである。実際に盛土内に 20kN/m^2 もの過剰間隙水圧が作用していたかどうか、凍土や雪氷の透水性はどの程度か、など更なる検証は必要であると考えられる。しかし本検討により、寒冷地における融雪期盛土災害のメカニズム解明に関しては、融雪水による盛土内の水位の上昇だけでは説明できないことが示唆されたといえる。

5. まとめ

平成26年度および平成27年度に実施した一連の調査・検討結果をまとめると以下の通りである。

1. 平成22年から平成24年の3年間における事例収集および整理から、北海道における盛土災害の発生件数は融雪期に卓越することがわかった。
2. 盛土内水位観測結果から、盛土内水位は融雪期に短期間で上昇する傾向にあることがわかった。
3. 本研究で対象とした現場においては、過剰間隙水圧を考慮しない通常のすべり安定解析では、融雪期の盛土災害を再現することができなかった。
4. しかし、盛土のり面等に存在する雪氷や凍土による透水性の低下を想定し、盛土内に過剰間隙水圧を作用させることで、融雪期の盛土災害を説明できることが示唆された。

なお、本研究は平成26年度～平成29年度の重点研究の中で実施される予定であったが、計画を変更し、平成28年度からプロジェクト研究「ゲリラ豪雨や急激な融雪等へ対応する道路のり面・斜面の合理的な管理手法に関する研究」として実施することとなった。今後は浸透流解析等も含め、融雪期の盛土災害メカニズムについてより詳細に検討を進める予定である。

参考文献

- 1) 横田聖哉、石田誠幸、高木宗男：駿河湾の地震における高速道路盛土の被災調査報告、第45回地盤工学研究発表会講演集、pp.1493-1494、2010.
- 2) (社)日本道路協会：道路土工—盛土工指針、2010.
- 3) 所哲也、山木正彦、三浦清一、高木歩維：凍結融解履歴が破碎性火山灰土の液状化強度に及ぼす影響、地盤工学北海道支部技術報告集、Vol.47、pp.131-138、2007.
- 4) 山木正彦、三浦清一、横浜勝司：破碎性火山灰土の変形特性に及ぼす凍結融解履歴の影響、土木学会論文集 C、Vol.65、No.1、pp.321-333、2009.
- 5) (公)地盤工学会：地盤調査の方法と解説（二分冊の1）、pp.244-246、2013.
- 6) (公)地盤工学会：地盤材料試験の方法と解説、2009.
- 7) (社)日本道路協会：道路土工—軟弱地盤対策工指針、2012.
- 8) 林啓二、原靖、松田圭大：積雪寒冷地において盛土法面に発生する知られざる現象、地盤工学会誌、Vol.63、No.4、pp.24-25、2015.

INVESTIGATION AND EVALUATION METHOD OF ROAD SLOPE ATABILITY DUE TO SNOWMELT (2)

Budged : Grants for operating expenses

General account

Research Period : FY2014-2017

Research Team : Cold-Region Construction

Engineering Research Group

(Geotechnical Research)

Author : HAYASHI Toshihiro

HAYASHI Hirochika

YAMAKI Masahiko

Abstract : In Hokkaido, embankment collapse has occurred on the Route 230 in May 2012 and April 2013. The subsequent investigation, the influence of snowmelt contributed to the collapse became clear. In the snowy cold regions, the need for maintenance and management of the road slope in consideration of the influence of snowmelt water was recognized. In study, the recent cases concerning embankment disaster in Hokkaido were collected, factors and time of occurrence were coordinated. Also, in order to grasp the water level in the embankment in winter and snowmelt season, the water level in embankment has damaged in the past snowmelt season was measured. And slope stability analysis was carried out in order to elucidate the embankment disaster mechanism of the snowmelt season.

Keywords : embankment, snowmelt water, measurements of water level