

第68回(2024年度) 北海道開発技術研究発表会論文

周氷河斜面における土砂災害防止

・ 軽減のための調査と試験

— 国道274号日勝峠の災害を踏まえて —

北海道立総合研究機構 エネルギー・環境・地質研究所

○石丸 聡

仁科 健二

加瀬 善洋

これまでの斜面对策は、そのほとんどが急傾斜地を対象とするものであった。しかし、近年の急激な気候変動にともなう豪雨の増加により、2016年の国道274号日勝峠や羅臼町主要道道87号など緩傾斜の周氷河斜面での斜面災害が頻発するようになった。そのため、これまで対象外であった周氷河斜面における土砂災害防止・軽減を目的として、その特性を踏まえた効果的な野外調査・室内分析手順を提案する。

キーワード：周氷河斜面、豪雨、透水性、崩壊痕跡

1. はじめに

北海道に広がるなだらかな丘陵の多くは、1万年以上前の氷期につくられた「周氷河斜面」で、特に夏季の降水量の少ない道東や道北地域に広く分布する(写真-1)。このような斜面は緩傾斜なため、これまでどちらかと言えば災害の少ない場所であった。しかし、近年の急激な気候変動にともなう豪雨の増加により、2014年の礼文島や稚内、2016年の日勝峠や知床など、周氷河斜面で斜面災害が頻繁に発生するようになった。そのため、これまでの急傾斜地を対象とした斜面災害対策に加え、緩傾斜の斜面が周氷河斜面であるかどうかを判断し、その特性を踏まえた対策を実施することが必要となっている。

そこで北海道立総合研究機構では、研究課題「豪雨による緩斜面災害を軽減するための研究」を寒地土木研究所等と共同で実施し、その成果として『周氷河斜面調査マニュアル』(以下、マニュアル)を執筆した。マニュアルでは、北海道各地に見られる周氷河斜面とその堆積物の詳細な記載・解析結果をふまえて、周氷河斜面の基本的な地形・地質学的な特徴を示すと同時に、崩壊メカ

ニズムや崩壊発生場について解説し、調査の手順を記した。本報告では、はじめに周氷河斜面の特徴について近年の災害を例に概説した後、マニュアルの調査と試験手順の概要を紹介する。

2. 周氷河斜面の特徴と抽出

周氷河斜面の地形的な特徴は、連続性の良い平滑な緩傾斜からなることである。現在の日本列島の山地・丘陵地では、おもに流水による侵食が卓越し谷が刻まれている。しかし寒冷な時代には、凍結融解による斜面表層付近の面的な土砂移動が活発で、斜面全体が傾斜方向にゆっくりと移動して、その結果、谷の未発達な平滑な斜面が形作られた。斜面の縦断形状は直線的で、斜面最下部に段丘面のあるところでは移動してきた岩層が堆積していくため、次第に斜面傾斜は緩くなる(図-1)。

北海道では、周氷河斜面は山岳地域に限らず低標高の地域にも分布する。海岸付近でも、急斜面の背後や氷期以前に形成された段丘面上に広がっていることがある。特に寒冷で雨の少ない道東・道北地方では、現在も流水



写真-1 礼文島に広がるなだらかな周氷河斜面

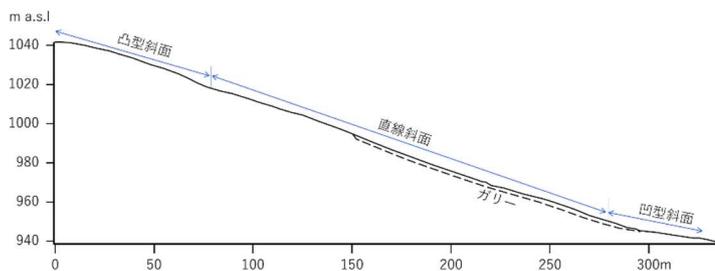


図-1 周氷河斜面の縦断面形状

による侵食の影響が小さいため谷があまり発達せず、周氷河斜面が保存されている。また道央や道南地方でも、周氷河斜面は軟岩地域を中心に分布する。

周氷河斜面の崩壊やその発生場所は、急斜面とは異なる特徴を有するため、災害を予測・回避するためには、まず周氷河斜面の分布範囲を把握する必要がある。最終氷期に形成された周氷河斜面は、その後の約1万年間の温暖な時代に侵食が進行したため、その結果形成された急傾斜の谷壁斜面より上方に位置する。したがって、両斜面の境界にあたる遷急線、すなわち後氷期開析前線¹⁾ (図-2) を見出せば、その上方が周氷河斜面となる。

次に、検討対象斜面が周氷河斜面の地形的な特徴(平滑・緩傾斜)を有するかどうかを地形図や空中写真を用いて確認する。地形図では、谷密度が低く、等高線が等間隔で直線的～緩やかな曲線で示され、傾斜が30°程度以下の斜面が該当する。簡便な抽出手順として、DEM上に設定した単位セルの法線ベクトルを求め、一定の範囲毎にベクトルの集中度合いを固有値比として算出し、その値を用いて判別する解析手法²⁾がある。固有値比は、ベクトルが一定方向に集中するほど大きな値を示す。マニュアルには、計算プログラム例を公開しているので、詳細はマニュアルを参照いただきたい。

3. 斜面崩壊のタイプと発生場

近年の豪雨の頻発により顕在化した周氷河斜面の崩壊は、将来さらに多雨化が進行した時の災害を想定する上できわめて重要である。2014年と2016年に北海道各地で発生した崩壊事例は、その形態・規模や崩壊層準の観点から大きく①深層タイプ、②浅層タイプ、③ガリータイプの3つのタイプに区分できる(写真-2)。

①深さ数m以上の周氷河堆積物(周氷河斜面を構成する堆積物)がえぐられる“深層タイプ”は、崩壊土量が多くなる。特に大量の水を含む場合は、斜面下に大きな被害をもたらすことがある。

②深さ1m前後の浅く平滑な“浅層タイプ”は、周氷河堆積物直上の黒土層やテフラ層を主体とする崩壊で、谷頭より上方のごく浅い谷型斜面で発生している。崩壊地

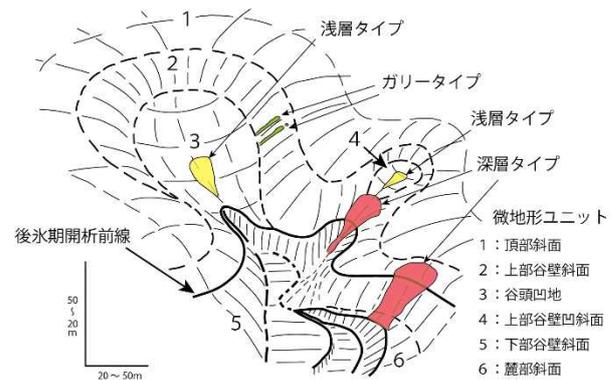


図-2 周氷河斜面の崩壊タイプと微地形との関係
(田村, 1990³⁾ に修正・加筆)

直下の沢に崩壊土砂が流れ込み、土石流化することがある。

③幅は狭いが深く線状に切り込まれる“ガリータイプ”は、土層内の地下侵食によりパイピングホールが発達してできたトンネル状の空洞に、表土が陥没することで、ガリー状の地形になったものである。ガリー状地形に流水が集中することで、斜面下に位置する法面で崩壊・侵食が見られることもある。

これらの違いを生む要因は、地形場と斜面の透水性および土質強度の鉛直プロファイルに求められ、調査の際の主要な着目点となる。3つの崩壊タイプは、微地形と次のような対応関係をもっている(図-2)。

①深層タイプの崩壊は、後氷期に侵食されてできた急傾斜面(下部谷壁斜面)と、緩傾斜の周氷河斜面(上部谷壁斜面)との境界である後氷期開析前線を跨いで発生する。②浅層タイプは、水の集まる緩斜面である谷頭凹地に生じる。③ガリータイプは平滑な上部谷壁斜面の中腹部で発生する。このため、斜面区分ごとに発生する崩壊タイプを予め想定した開発計画や現地調査、対策工の設計を行うことが重要となる。特に、海岸沿いの標高の高い段丘面は厚い周氷河堆積物に覆われていることがあり、一層の注意が必要となる。

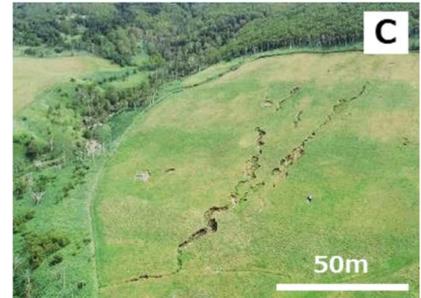
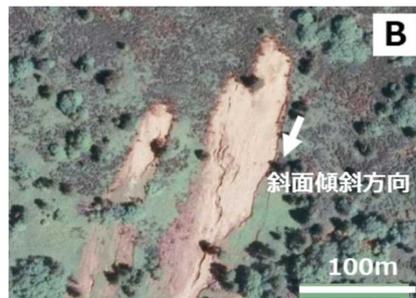


写真-2 周氷河斜面の3つの崩壊タイプ

(A) 深層タイプ(南富良野町串内) (B) 浅層タイプ(日高町日勝峠西方、林野庁撮影オルソ画像)
(C) ガリータイプ(南富良野町串内)

4. 周氷河斜面に見られる崩壊の痕跡

急激に温暖化した後氷期（過去1万年）の間に、雨の少ない北海道においても緩傾斜の周氷河斜面で崩壊・侵食が少しずつ進行し、その痕跡が地形として残されている。海岸や河岸沿いに形成されている標高の高い段丘の前面に見られるえぐられたような地形（写真-3）は、段丘面上の厚い周氷河堆積物に深層タイプの崩壊が過去に繰り返して生じたことを示すものである。

平滑な緩斜面の中腹部には、ガリー状の谷地形が平行に並んで発達していることがある（図-3）。これは過去に発生したガリータイプの痕跡である可能性がある。

このように過去の崩壊の痕跡が見られる斜面の周辺では、今後発生する豪雨により同様の崩壊が発生する可能性が高いと判断することができる。

5. 周氷河斜面の堆積物

(1) 層相区分と堆積物の厚さの把握

周氷河斜面は、おもに基盤岩とそれを覆う周氷河堆積物から構成されている（図-4）。基盤岩は新鮮岩と風化岩に分けられるが、多くの場合その境界は漸移的である。また周氷河堆積物は風化岩を覆っているが、周氷河堆積物と風化岩盤の境界も漸移的であることが多い。

周氷河堆積物は斜面上部で薄く、下部で厚くなる傾向を示す（図-5）。周氷河堆積物を構成する碎屑物の主

な供給源は風化岩起源の岩屑であるが、それに風成塵やテフラが混合する。

生産された岩屑は風成塵やテフラと共に凍結融解によって斜面下方に移動し、移動の過程で細粒化する（図-5）。そのため全体として上方細粒化を示すことが多いが、しばしば大礫～巨礫サイズの孤立した岩塊が上部層準に配列する場合がある（図-4）。

礫からシルトまでの様々な粒径に破碎された岩屑（碎屑粒子）の粒径や形状は基盤岩の岩種・岩質に強く規制される。基本的に淘汰が悪いため特定の粒径成分が卓越するということがなく、層相区分するのが難しい場合も多いが、通常の堆積物と同様に礫質、砂質、シルト質（ローム質）に大きく3分でき（図-6）、さらに礫の割合や配列、成層構造の有無により細分が可能である。

粒径分布ではモード径の山が低く、幅広い粒径の碎屑粒子が比較的均質に含まれ（図-7）、累積加積曲線でS字を描かず直線的となる（図-8）。

周氷河堆積物の厚さを簡便に把握する調査としては、検土杖と簡易貫入試験がある。簡易貫入試験では、弱風化～未風化の大きな礫（概ね大礫サイズ以上）の影響を除けば、周氷河堆積物は全般に低いNd(Nc)値を示し、下位に向かってゆるやかに増加する。先端のコーンが風化岩盤に入ると、Nd(Nc)値が急増するため、その変曲点をもって、周氷河堆積物と風化岩盤との境界と判別することができる。

周氷河堆積物と風化岩盤との境界は、検土杖で採取



写真3 周氷河斜面の末端に並ぶ過去の崩壊地形（白矢印）。白破線は段丘面の基底

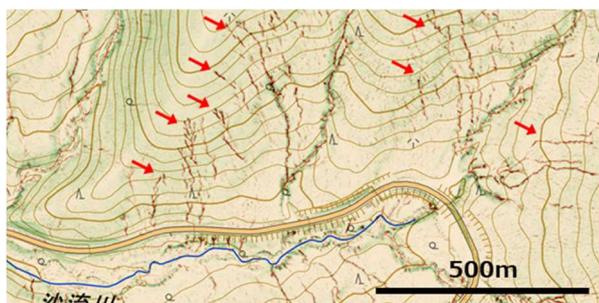


図3 周氷河斜面中腹に並ぶ過去のガリータイプの崩壊地形（赤矢印）

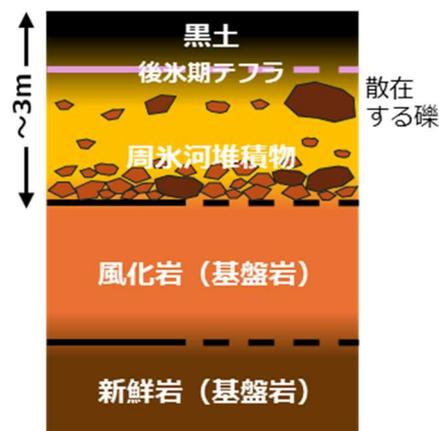


図4 周氷河斜面の模式的な構成物（岩屑移動域）

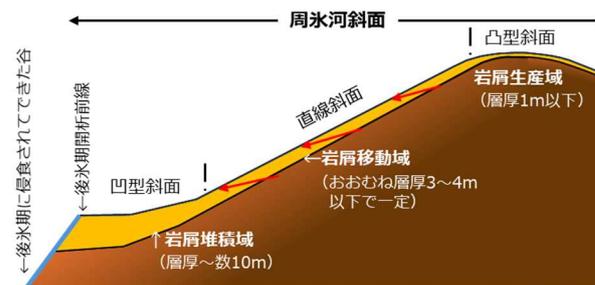


図5 周氷河斜面と周氷河堆積物の模式縦断面

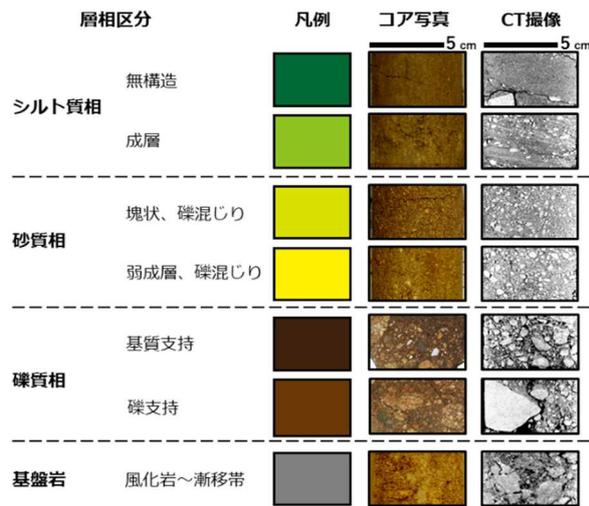


図-6 周氷河堆積物の区分例

した試料も参考にして認定する。しかし層相を検土杖のみで判断するのは困難なため、正確な認定には近傍での露頭観察やボーリング調査が必要となる。浅い深度（～1.5m）に限ればハンドコアラーによる掘削も可能である。なお掘削調査を補完するものとして地中レーダ探査を実施することができれば、比較的容易に周氷河堆積物の厚さ、広がりを見積ることができる。

(2) 堆積物の透水性の把握

周氷河堆積物は一般に透水性が低く、それらと直上・直下の地質との間で透水性のコントラストを生じること、また飽和時にせん断強度が著しく低下する特性を示す場合があり、そのことが斜面崩壊の主要な要因の1つとなっていると考えられる。したがって、対象斜面の斜面構成物の層序と、層序区分ごとの透水係数、土質強度定数、およびそれらの垂直プロファイルを一層明らかにし、斜面の豪雨に対する応答を類推することが必要となる。

透水試験はボーリング孔を活用した原位置試験も可能であるが、基盤岩から周氷河堆積物の詳細な水理構造を把握する必要がある場合には、高品質ボーリングコアによる室内試験を実施することを推奨する。

基盤地質が異なる周氷河堆積物コアから求めた透水性の鉛直プロファイル⁵⁾を図-9に示す。概ね共通する特徴として、周氷河堆積物最上部のシルト質相が細粒分に富み、相対的に低い透水係数 ($10^{-6} \sim 10^{-5}$ m/s) を示す。黒土の透水性が相対的に高いため、透水性のコントラストが生じる。ただし図-9の片岩地域では、シルト質部の透水性が高くなる。

一方、片岩地域を除くと、周氷河堆積物の主体である砂質相・礫質相はシルト質相より相対的にやや高い 10^{-5} m/s 程度の透水係数を示す。さらに深部では、風化岩（周氷河堆積物からの漸移部含む）で相対的に透水性が高くなっており ($10^{-5} \sim 10^{-3}$ m/s)、周氷河堆積物との間で透水性のコントラストが生じている。

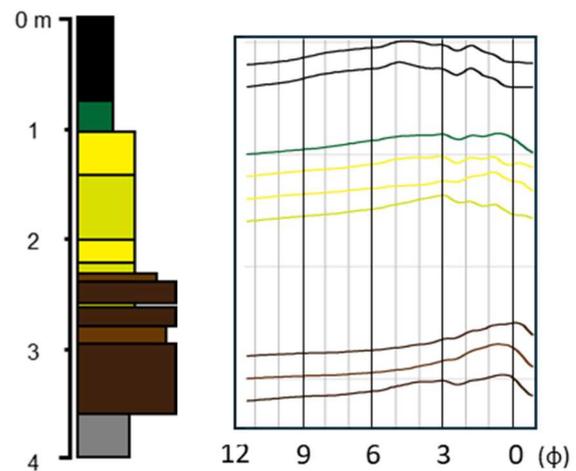
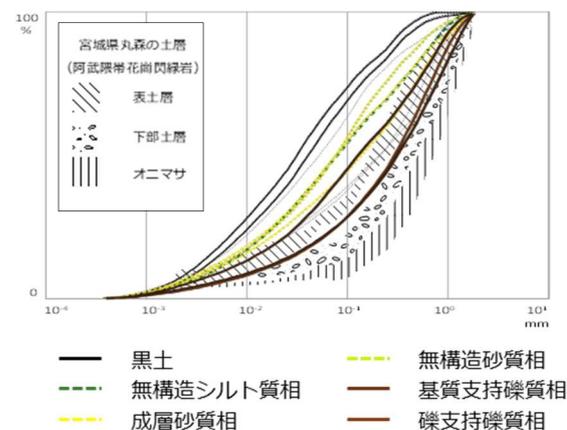


図-7 片麻岩地域の周氷河堆積物の粒度分析結果（南富良野町市内）凡例は図-6を参照

図-8 宮城県丸森町と北海道南富良野町の土層の粒度の比較（宮城県丸森の土層の粒度は、若月ほか⁴⁾による）

以上をまとめると、周氷河堆積物は、相対的に透水性が高い上位（黒土）・下位（風化岩）の地質に対して低透水層となっている。なお、風化岩より深部の新鮮岩では透水性が下がると推定されるが、直接のデータは得られていない。

(3) 土質強度の把握

土質強度についても基盤岩から周氷河堆積物を詳細に把握する必要がある場合には、高品質ボーリングコアによる室内試験を実施することを推奨する。

ここでは、基盤地質が異なる周氷河斜面における、簡易貫入試験から求めたせん断抵抗角（換算 ϕ ）の鉛直プロファイルと、高品質ボーリングコアのそれぞれ3層準の試料を用いて計測した三軸圧縮試験（Cubar試験）による全応力および有効応力のせん断抵抗角（ ϕ_d ）⁵⁾を図-10に示す。

Cubar試験による有効応力のせん断抵抗角は、概ね簡易貫入試験から求めたせん断抵抗角と同程度か、より大きな角度を示した。しかし圧密非排水条件における全応

力のせん断抵抗角は、花こう岩および片麻岩地域の周氷河堆積物で著しく小さくなった（A・Bの層準①、②）。一方、風化岩では、花こう岩・片麻岩ともに全応力および有効応力のせん断抵抗角に差はない（同③）。それとは反対に、片岩地域では周氷河堆積物の全応力および有効応力のせん断抵抗角に差がなく（Cの①、②）、風化岩で全応力のせん断抵抗角が著しく小さくなる（同③）

ことが確認された。

測定データが限られるため、現状ではどのような特徴を持つ堆積物や風化岩石種が全応力のせん断抵抗角の低下を示すのかは不明である。しかし、そのような地質では豪雨時に強度が著しく低下する可能性があり、透水性とともに土質強度特性が崩壊機構を規制していると考えることができる。

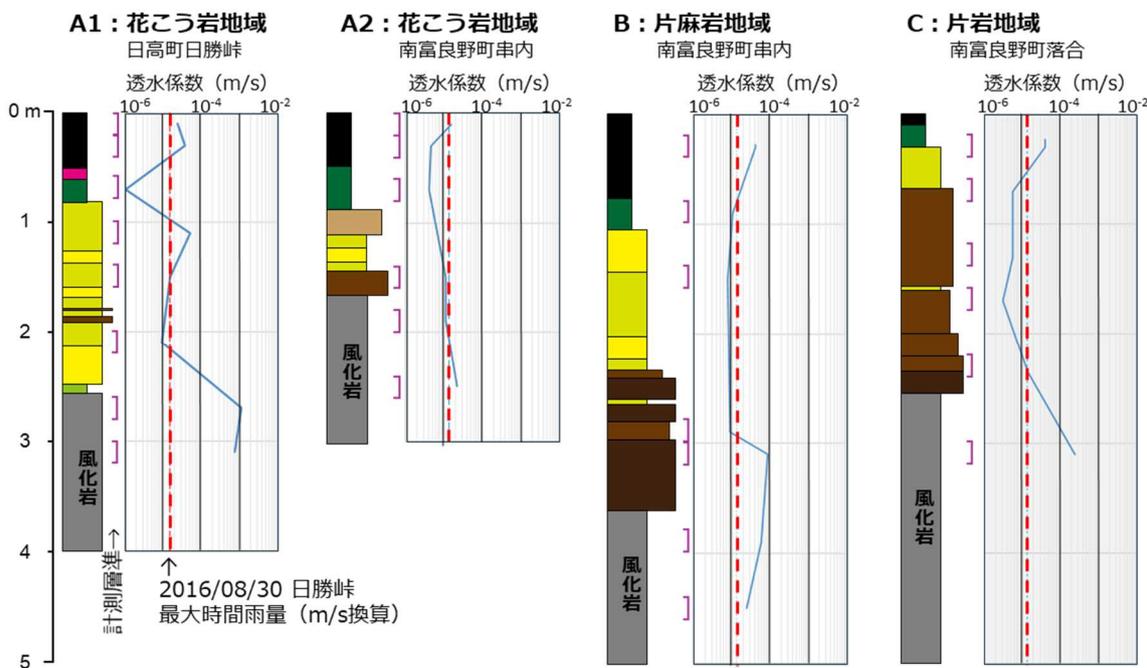


図-9 室内試験による周氷河斜面の透水係数の鉛直プロファイル

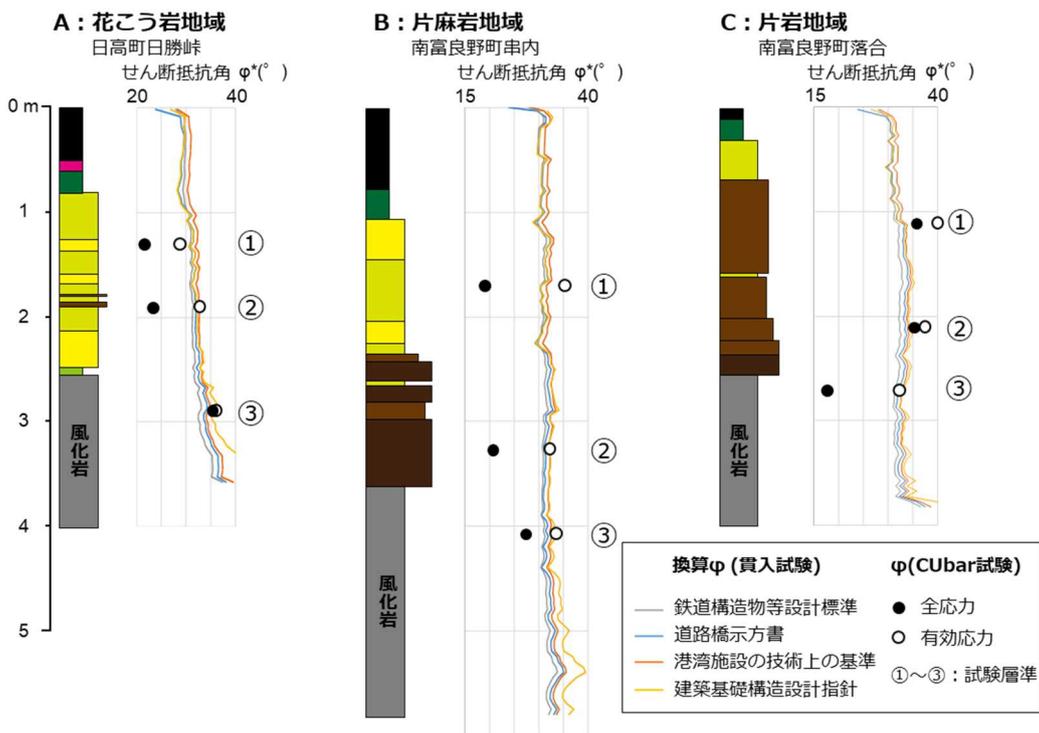


図-10 周氷河斜面におけるせん断抵抗角の鉛直プロファイル

6. 崩壊危険箇所の抽出

周水河斜面の土層やそれに起因する斜面崩壊は、一般斜面のものとは異なる特徴を持つことから、対象斜面とその周辺域における周水河斜面の地形・地質の基本特性を把握した上で開発を行う必要がある。

例えば、斜面の切土を計画する際には、図-11に示した手順により崩壊の危険性を判断し、対策を検討する。はじめに対象斜面の地形場から崩壊タイプを想定し、層序・透水性・強度の鉛直プロファイルが崩壊を生じやすい条件になっているか確認し、それらの条件を元に切土周辺の処理に関する対応を決定することを提案する。

参考文献

1) 羽田野誠一 (1986) : 山地の地形分類の考え方と可能性.

東北地理, 38, 87-89.

- 2) 内田太郎・中野陽子・秋山浩一・田村圭司・笠井美青・鈴木隆司 (2010) : レーザー測量データが表層崩壊発生斜面予測及び岩盤クリープ斜面抽出に及ぼす効果に関する検討, 地形, 31, 383 - 402.
- 3) 田村俊和 (1990) : ミクロな自然環境要素のとらえ方 微地形. 松井 健・武内和彦・奥西一夫・田村俊和編 : 丘陵地の自然環境, 古今書院, 177-189.
- 4) 若月 強・吉原直志・遠藤悠一・大森 想・島田真紀子 (2022) : 令和元年 (2019 年) 東日本台風による斜面崩壊地の岩石・土層物性 : 特に宮城県丸森町周辺のいくつかの事例について. 防災科学技術研究所主要災害調査, 58, 35-52.
- 5) 小安浩理・坂本尚弘・川上源太郎 (2025) : 周水河堆積物の層序と崩壊メカニズム—平成28年8月北海道豪雨による日勝峠周辺の例—. 第68回(2024年度)北海道開発技術研究発表会発表論文集.

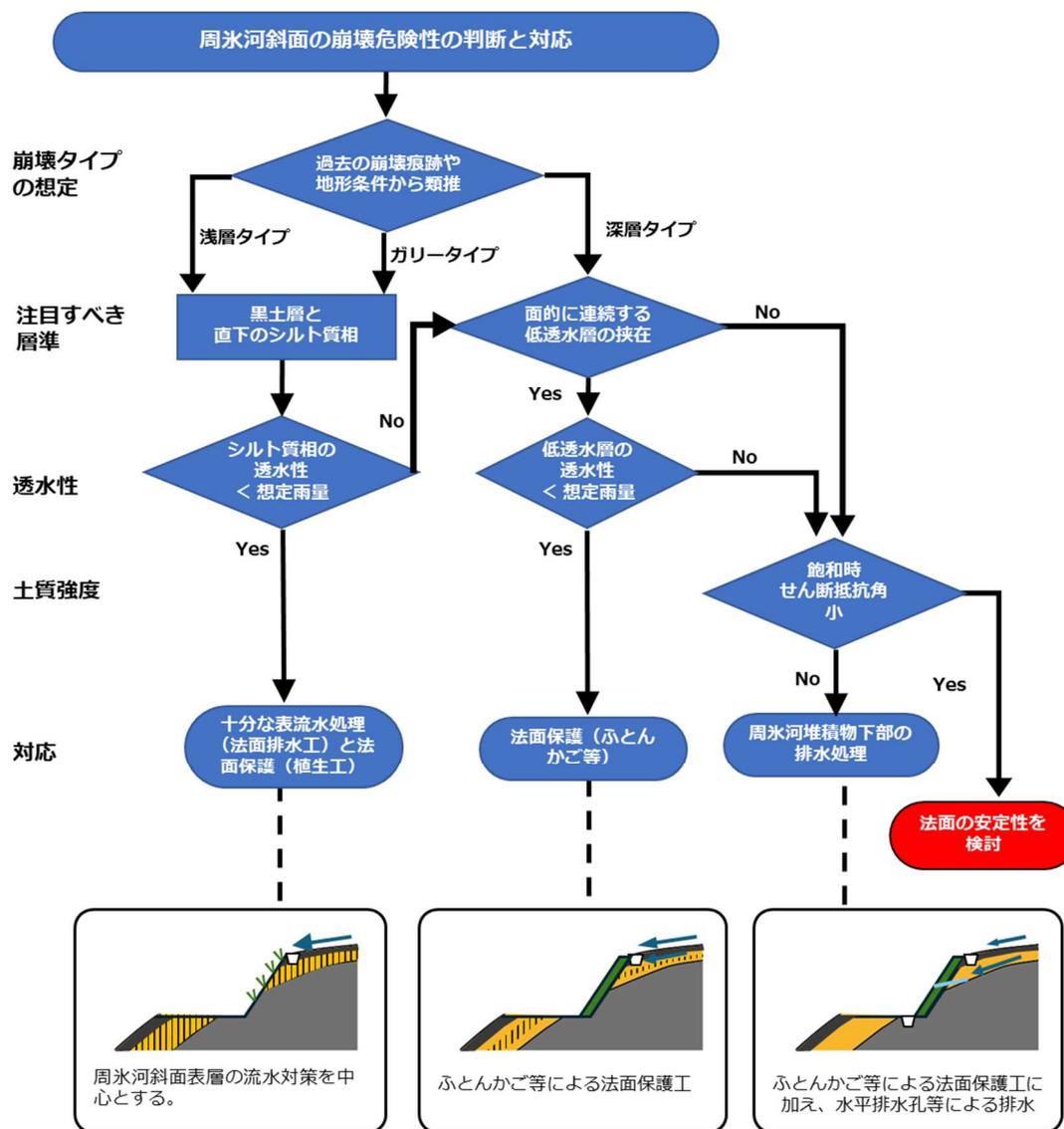


図-11 周水河斜面の崩壊危険性の判断フローと対応 (案)