

岩盤斜面の既往崩壊事例分析による 崩壊原因の整理と崩壊形態のモデル化

日外 勝仁^{1*}・宍戸 政仁¹・阿南 修司¹・伊東 佳彦¹

¹(独)土木研究所 寒地土木研究所 防災地質チーム (〒062-0931 北海道札幌市豊平区平岸1条3-1-34)

*E-mail: k-agui@ceri.go.jp

岩盤斜面崩壊に関する既往文献から、火砕岩や付加体といった崩壊岩体の地質の違いに留意しつつ、岩盤斜面崩壊の素因・誘因の抽出を行った。その結果に基づき、崩壊に至る進行性要素に注目し、崩壊要因を踏まえた安定性評価上の点検時の着目点について整理した。また、収集した既往崩壊事例の内詳細な調査資料があるものについて、崩壊の運動形態だけではなく崩壊要因も考慮した崩壊形態のモデル化を行い、不連続面構造等を表した斜面の三次元模式図に、資料等から推定される崩壊の主因、伏在要因、トリガー等を附記した崩壊形態模式図としてとりまとめた。

Key Words : Rock slope failure, Cause of collapse, Case Study, Check point, Collapse form, Modeling

1. はじめに

岩盤斜面の安定性評価を行うに当たっては、どの箇所でも、どのような崩壊形態で崩壊が発生するかを適切に想定する必要がある。その際に、地形・地質条件が類似した周辺地域における崩壊発生履歴を調べ、起こりえる崩壊形態と原因を漏れなく把握しておくことが重要である。

本研究においては、岩盤斜面崩壊に関する文献を収集し、崩壊の素因・誘因を全て抽出し、斜面を構成する地質の違いや、崩壊形態の違いに留意した上で、斜面調査時の着目点の整理を行った。収集事例の内、詳細な調査資料のある54事例⁽¹⁻²¹⁾については、北海道開発局²²⁾に基づき、滑動型(平面すべりa-c, くさびすべりab, 円弧すべりa-d, 複合すべりa-d), 崩落型a-e, 転倒型a-e, 座屈型abといった崩壊タイプに区分し、崩壊の素因や誘因を記載するとともに、崩壊の発生形態が読み取れる模式図の作成を試みた。

2. 岩盤斜面の安定性評価上の着目点

土木学会²³⁾では素因・誘因について、最終的には岩盤崩壊を引き起こすと考えられる要因について、「斜面への作用力」とその結果として「生成される崩壊要因(現象)」に区分している。本稿では、素因の要素と不安定化を促進するような進行要素とに分け、不安定化進行に伴って現れると考えられる前兆的現象についても整理し、

着目点として、地形、地質、亀裂、地下水、人為的な要素、気象、前兆的現象の7項目にとりまとめた。

(1) 地形

a) 出尾根

出尾根は北陽⁸⁾及びえりも⁹⁾で報告があるが、増毛²⁰⁾も出尾根状である。前者は斜面クリープの発生の意味で重要である。後者は近傍が崩壊した落ち残りとして出尾根となっている部分であり、その原因把握が重要となる。

b) 脚部形状

・オーバーハング(OH) : 火砕岩の崩落において重要な素因となっており、OHが無い状態で生じた崩落は平面すべりやくさびすべりに近いが、脚部が座屈のようにせん断された場合に限られ、5例確認された。タフォニ(蜂の巣状の集団小孔)が発達する砂岩や凝灰岩の急崖では、穴の上部が小さなオーバーハング形状となることから、崩壊規模としては全般に小さなものとなる。

転倒においても重要な着目点であり、地震時以外のほとんどがOHを伴う。座屈では3例中1例がOHを伴う。

・脚部浸食進行 : 崩落a,b,cのほとんどで認められる。崩落eでは報告は半数以下である。滑動型、転倒、座屈においても認められるが、記載のない場合の方が多い。斜面の不安定化の要素として普遍的であるが、必須ではない点に留意すべきである。OHを生じる岩体は、下位に相対的に弱い層があることがほとんどだが、盃の崩壊²¹⁾にみられるような下位が亀裂に富む場合にも発生する。

c) 波食

OHの成因となる営力として知られているが、この点を明確にしている報告は少ない。脚部の浸食原因として波食以外に河川浸食がある。

(2) 地質

a) 素因的要因

・崩壊岩体岩種：北海道日本海沿岸における大規模岩盤崩落検討委員会報告書²¹⁾から多くの事例を引いた関係から火砕岩が圧倒的に多く、火砕岩33、溶岩・貫入岩12、付加体6、溶結凝灰岩1、圧砕岩1、先白亜紀火山岩1（濃飛流紋岩類）の構成である。崩壊岩体の岩種は亀裂頻度と崩壊規模の関係については既往文献等²¹⁾でも議論されている。亀裂頻度の不均質性（いわゆる落ち残りや塊状部の存在）にも着目する必要がある。

滑動型を生じる岩種は付加体が多いが、火砕岩では崩落に近い形態で生じている。崩落は全て火砕岩及び溶岩で生じており、転倒は溶岩と火砕岩が同程度、座屈は火砕岩及び溶結凝灰岩で生じている。

・脚部岩体岩種：崩落斜面では崩壊岩体と脚部岩体とで種類が異なる場合がある。脚部岩体岩種は転倒及び座屈の形態で特に重要であり、岩盤強度や風化劣化の進行と併せて評価が必要である。

・岩盤強度：崩落、転倒及び座屈では脚部の岩盤強度が崩壊を左右する要素となる場合がある。膨潤性鉱物による急速な劣化等による岩盤の風化・劣化の進行を考慮した評価が必要である。崩壊を再現したシミュレーションから逆算された岩盤強度はコア等から実測された強度よりも小さい場合があることが知られている。シミュレーションの活用により岩盤強度と崩壊との関連性を想定することが期待される。

b) 進行要素

・風化・劣化の進行：この点に関する評価結果は天城岩³⁾や第二白糸トンネル(T)⁹⁾があり、忍路⁷⁾においても指摘がある。座屈や崩落において分離面との関係性から支配的な要素となっているが、これらに関しては今後の解明が待たれる。

付加体における滑動型の崩壊でも岩体内部の風化・劣化はすべり面の形成において必須の要素である。

c) 地質構造

・基部の脆弱層：崩落の多くの事例で報告がある。
・キャップロック構造：付加体におけるトップリングクリープからすべり破壊を生じる斜面において報告がある（北陽⁸⁾、ナンノ崩壊¹²⁾、猿なぎ¹⁸⁾）。火砕岩では溶岩のキャップロック構造が多数認められるが、川下^{6), 24)}で崩壊形態に結びつけた評価もされている。キャップロック構造は地すべりにおける素因としてよく知られているが、岩盤崩壊においても評価していく必要がある。

(3) 亀裂

a) 素因的要因

・非構造的な亀裂：シーティング等の非構造的な亀裂が分布する場合には、伸張・連結することで分離岩体の不安定化が進行していく点について評価することが求められる。現状では斜面内部におけるこれらの発生を合理的に評価する方法はないが、表層の観察や周辺の類似箇所に見られる既往崩壊跡の調査から可能な範囲で存在の可能性を検討しておく必要があり、点検調査において着目すべき課題である。

・断層・構造的な節理：ほぼ全ての事例において分離岩体の形成に関連しているが、忍路⁷⁾は関連していない可能性があり、初生的な崩壊を想定する必要がある。これらの断層や亀裂は分離岩体規模の規制や強度低下等により崩壊をコントロールすると考えられる。滑動型においてもすべり面の多くは層理等の構造的な亀裂に起因している。

・潜在的な亀裂状構造の分布：非構造的な亀裂の発生や岩盤のせん断方向に関連して重要な要素である。これらには堆積構造や堆積岩（火砕岩）における固結度の違い、変質度の違い等様々なものがある。分離岩体の形成がこれらの構造に規制される可能性が考えられる場合には評価が必要である。

b) 進行要素

・亀裂の伸張・連結：崩落（特にa及びe）においては既存の亀裂の風化劣化のみでは説明できない現象が多く認められ、非構造的な亀裂の発生やせん断に伴う亀裂の連結が生じていると考えられる。滑動型の崩壊でも付加体内部の亀裂の連結によりすべり面が形成されることが報告されている。

・亀裂の風化・劣化：火砕岩に多い崩落では背面の亀裂が最終的な崩壊を生じた原因になっている場合が非常に多い。最終段階で破壊した位置が、転倒や座屈では背面と下面の数がほぼ同じ程度であった。滑動型では便宜的にすべり面＝下面が最終崩壊位置とした。

亀裂の強度は間隙水圧の影響も受ける。また、亀裂の挟在物が劣化しやすい鉱物である場合は亀裂の強度低下の原因ともなるため、挟在物の性状も重要な要素となる。

c) 亀裂構造

・流れ盤：滑動型の崩壊ではほとんどの事例で流れ盤が分布する。崩落でもa及びeにおいて流れ盤の分布が崩壊に関与しており、脚部における流れ盤の存在で崩壊の有無が決定されている。

・白色脈・粘土挟在：付加体の崩壊において、最終的な崩壊面（すべり面）がこれらを挟在する亀裂であることがえりも⁹⁾において報告されている。

また、着目点及び前兆的現象発現箇所について、火砕岩、付加体という地質別に図-1、図-2に例示した。

3. 岩盤斜面崩壊の模式化

各崩壊形態は北海道開発局²³⁾において断面図に示されているが、個々の崩壊事例について三次元的なイメージを模式的に示すことで、崩壊形態毎の類似性や多様性が明らかとなることが期待される。前章では斜面に対して複合的に作用し崩壊を引き起こす要因の存在有無を確認する為の着目点を整理したが、これら着目点を点検調査する場合には、崩壊形態を検討する必要があるが、模式化された崩壊事例を活用し、対象斜面を類似する既往崩壊事例に当てはめることが有効であると考えられる。

詳細な調査資料のある54事例から崩壊形態毎に代表的な事例を抜き出し、図-3に示す凡例に従い、崩壊形態を単純化した崩壊形態模式図(図-4)を作成した。

- ・滑動型：平面すべりa(太島内B²¹⁾)、平面すべりb(大天狗²¹⁾)、くさびすべりa(刀掛B²¹⁾)、複合すべりa(えりも⁹⁾)、複合すべりc(北陽⁸⁾)
- ・転倒型：転倒c(刀掛A²¹⁾)、転倒d(鷹ノ巣A²¹⁾)、転倒e(越前海岸¹⁷⁾)
- ・座屈型：座屈a(大崩海岸¹⁴⁾)
- ・崩落型：崩落a(釜²¹⁾)、崩落b(滝の沢A²¹⁾)、崩落c(川下^{6,24)})、崩落e(茂津多B²¹⁾)

モデル化に当たっての留意点を以下に記す。

- ・斜面側面の拘束状態により拘束／非拘束を区分
- ・分離岩体を形成する分離面の区分

主 因：当初より明瞭なもの(黒斜線部)

伏在要因：崩壊の最終段階で生じたせん断もしくは分離面(赤斜線部)

文献等に記載はないが分離面の存在が想定される部分(白抜き部)

- ・切土法面やトンネル等を図示
- ・滑動方向は想定されるものを図示
- ・記載のある分離面の傾斜を図示
- ・OHは記載がない場合でも想定される場合には図示

防災の観点から崩壊の発生を評価する上で、崩壊の最終段階において決定的な役割をする部分は特に重要である。模式図において伏在要因とした部分がこれに該当する部分であり、事前評価では次のように考えられる。

主 因＝崩壊機構を形成する要素となっており、明瞭に評価可能

伏在要因＝主因と同様に機能したと想定されるが、詳細な評価が困難

図-4に記載した「崩壊状況」は、崩壊形態を主要な着目点を含めて具体的に示している。「トリガー」は、崩壊が発生する直前に生じたと想定される現象について抽出しており、亀裂面の強度低下等のように通常は素因的な要素として評価されている内容も含んでいる。伏在要因とトリガーは現時点では明確に確認されていない内容

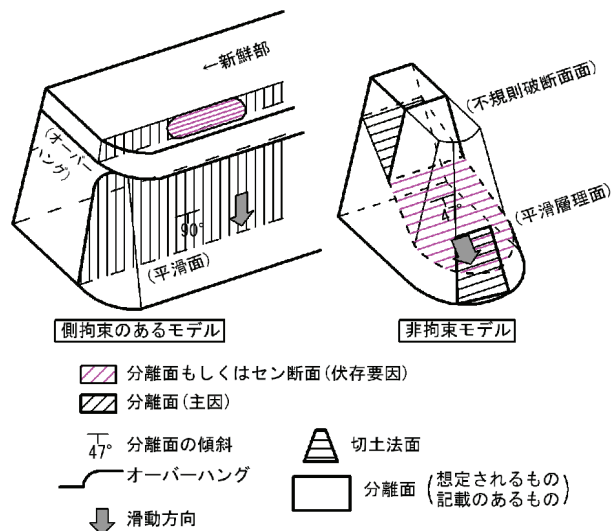


図-3 崩壊形態模式図の凡例

表-2 既往岩盤崩壊にみる崩壊の事前予測の可能性

	全体																
	火砕岩				溶岩・溶結凝灰岩				付加体								
	滑動型	崩落型	転倒型	座屈型	滑動型	崩落型	転倒型	座屈型	滑動型	崩落型	転倒型	座屈型					
位置規模明瞭	4	4	0	0	8	23%	1	2	0	0	3	27%	0	0	0%	11	21%
崩壊範囲想定可	1	12	6	2	21	60%	0	3	3	0	6	55%	3	3	50%	30	58%
想定外	0	6	0	0	6	17%	1	0	0	1	2	18%	3	3	50%	11	21%

も含んでいるが、模式図に示される斜面が崩壊した課程を理解する上で有効であると考えられる。これらは、調査点検において具体的に評価する内容を検討する場合に参考となることが期待される。

対象となっている斜面が模式化された既往崩壊のいずれかに該当する場合には、すでに既往の点検項目として評価されている内容について、それらが最終段階で分離岩体を形成もしくは崩壊させる働きをするかどうかを評価する上で参考にすることが可能である。

現状では、崩壊がなぜその時点で発生したのかについて、多くの場合に不明な点が少なからず存在している。その内容を曖昧なままにせず課題として明確化することで、今後に解決する可能性につなげていくことが期待される。例えば、増毛²⁰⁾のように分離面の連結もしくは座屈＝破壊を事前調査で把握し予測することは困難である。しかしながら、なぜ落ち残っているのか、分離面が分布しないのか、亀裂間隔が広いのかといった落ち残り部分を評価することで、危険性のある程度抽出することが可能になると考えられる。

また、収集した52事例について、崩壊の事前予測が可能かどうか、位置規模明瞭(○)、崩壊範囲想定可(△)、想定外(×)の3段階で判定した(表-2)。主因、伏在要因とした分離面の明瞭さが、崩壊を事前予測するに当たって大きく影響する要素といえる。全体の約8割が何らかの予測は可能であったが、地質の複雑な付加体においては、崩壊位置規模を事前に予測できた例は0件であり、評価の難しさが浮き彫りになった。

崩壊形態	平面すべりa	平面すべりb	くさびすべりa	複合すべりa	複合すべりc
地点名	太島内B	大天狗	刀掛B	えりも	北陽
モデル					
崩壊状況	層理面沿いのすべり	柱状節理が連結したすべり	くさび状亀裂によるすべり	斜面に平行な2方向の亀裂に沿ったすべり	流れ盤によるすべり
主因	・細粒火砕岩における流れ盤層理面	・褐色化した流れ盤柱状節理 ・両側側方岩体の浸食・欠如 ・流れ盤の分離面(柱状節理)	・2方向の流れ盤崩壊面 ・片側側方岩盤の浸食・欠如	・トップリングクリープ現象	・斜面上部の開口亀裂 ・石灰岩・チャート互層のキャップロック
伏在要因		・斜面脚部の浸食	・分離面の強度低下	・亀裂沿いの乾湿繰り返しで岩盤劣化・強度低下	・斜面下部の鏡肌を伴う流れ盤亀裂
トリガー	・片側側方岩体の浸食・欠如 ・斜面脚部の支持力低下または欠如 ・細粒火砕岩の強度低下	・崩壊部背面の強度低下 ・北海道南西沖地震(1993)	・地震動	・地震動 ・暖気による融雪水の浸透	・自重・地下水で岩盤劣化 ・3週間前の記録的豪雨に伴う水頭上昇 ・斜面脚部の崖縁崩壊

崩壊形態	転倒c	転倒d	転倒e	座屈a	崩落a
地点名	刀掛A	鷹ノ巣A	越前海岸	大崩海岸	盃
モデル					
崩壊状況	下部分離面に沿ったすべりから転倒	背後の分離面形成による転倒	岩体背後の開口亀裂によりトップリングし転倒	脚部流れ盤によるすべり	2方向の垂直亀裂に上部亀裂が連結した崩落
主因	・崩壊面下部の流れ盤分離面 ・側方岩体の浸食・欠如	・斜面の奥に伸びる平滑な分離面 ・片側側方岩盤の浸食・欠如	・構造性節理が発達 ・基部(凝灰岩)におけるオーバーハング	・脆弱な構成岩盤	・測面の分離面となる節理 ・脚部オーバーハング
伏在要因	・崩壊面上部の受け盤分離面	・背後におけるやや受け盤状の不規則分離面	・岩体背後の開口亀裂の拡大・劣化		・斜面に平行な一部新鮮色を残す節理 ・水平な頭部亀裂
トリガー	・地震動 ・岩盤下部分離面の強度低下	・岩盤背面の強度低下 ・岩盤下部の支持領域の減少・欠如	・開口部への落石落下 ・亀裂面の強度低下	・旺盛な浸透水による粘土鉱物の汚泥化 ・背面亀裂の強度低下	・片側側方岩体の浸食・欠如 ・分離面の強度低下 ・脚部オーバーハングの進行 ・岩盤上部の強度低下

崩壊形態	崩落b	崩落c	崩落e	凡例 新節理 分離面(主因) 分離面(伏在要因) 分離面の傾斜 オーバーハング 滑動方向 切土法面 分離面(想定されるもの/記載のあるもの)
地点名	滝の沢A	川下	茂津多B	
モデル				
崩壊状況	高角度層理面沿いの崩落	脚部崩壊による多亀裂硬質岩体の崩落	側面亀裂の分離による崩落	
主因	・斜面に平行する火砕岩の流れ盤層理面	・安山岩脚部における軟質な火砕岩の分布	・斜面に平行な褐色化した急立流れ盤の分離面 ・溶岩脚部の火砕岩後退によるオーバーハング化	
伏在要因	・頭部亀裂沿いの溶食	・脚部火砕岩の後退によるオーバーハング化 ・斜面クリープによる荷重集中	・やや新鮮な側面亀裂の分離面化	
トリガー	・層理面の強度低下	・小崩壊による脚部のノッチ化 ・地下水浸透の間隙水圧上昇で上部岩盤亀裂伸張	・地震動 ・側面亀裂の強度低下もしくは亀裂発生 ・岩盤下部の支持領域欠如	

図-4 崩壊形態模式図

4. まとめ

過去の岩盤斜面の崩壊事例を分析することにより、崩壊原因を洗い出すとともに、崩壊形態や地質別に調査における着目点がどう異なるのかを明らかにした。また、北海道を主とした代表的な岩盤斜面崩壊について、崩壊時の分離面を表現した分かりやすい模式図を作成し、崩壊形態のタイプの他に、崩壊状況、主因・伏在要因（素因）、トリガー（誘因）も併せて記載した。

本資料は実際に崩壊した斜面が、こういった主因、潜在要因を内包し、どの分離面において崩壊に至ったのかを明らかにする有益な基礎資料である。今後、同様の地形・地質を示す斜面を新たに調査する際には、過去の崩壊事例と照らし合わせることで、崩壊形態の可能性を幅広く参照し、調査における着目点の見逃しも減らすことが可能となる。

今回模式化した崩壊形態について、簡単な数値解析を併用し、現地調査と簡便数値解析による概略的な安定性評価を密接に連携することで、潜在的な崩壊要因の可能性を考慮した複数の崩壊シナリオの想定と、現地調査による事象の確認と数値解析による危険度・安定度評価による想定シナリオの棄却絞り込みが可能となり、いずれ起きるかもしれない「想定外」要因による崩壊の発生が現状より少しでも減らすことができれば幸いである。

参考文献

- 1) 室町忠彦, 森野亮宏, 上沢弘, 飯島哲之助, 桜井孝, 今井篤雄: 国鉄沿線における斜面災害の実態 (1), 鉄道技術研究報告, No. 1012, pp. 35-40, 1976.
- 2) 北海道開発庁北海道開発局札幌開発建設部: 一般国道 231 号浜益郡浜益村雄冬地内雄冬岬トンネル崩壊性地すべり調査報告書, 1982.
- 3) 鈴木哲也, 町屋安定, 上田敏雄: 溶結凝灰岩における地下水流動と崩壊, 日本応用地質学会研究発表会講演論文集, pp. 235-238, 2001.
- 4) 豊浜トンネル崩落事故調査委員会: 同報告書, 1996.
- 5) 第 2 白糸トンネル崩落事故調査委員会: 同報告書, 1998.
- 6) 日外勝仁, 伊東佳彦, 中川伸一: 浜益村川下斜面における崩壊と地質, 地盤工学会北海道支部技術報告集, 45, 2005.
- 7) 一般国道 5 号小樽市忍路地区斜面对策検討会: 同報告書, 2007.
- 8) 一般国道 333 号北陽土砂崩落調査委員会: 同報告書, 2002.
- 9) 一般国道 336 号えりも町斜面崩壊調査委員会: 同報告書, 2004.
- 10) 伊藤彰彦: 帰雲山大崩壊, 新砂防, Vol. 40, No. 4, 1987.
- 11) 網木亮介: 名立崩れ, 新砂防, Vol. 40, No. 5, 1988.
- 12) 山内修: ナンノ崩壊, 新砂防, Vol. 38, No. 4, 1985.
- 13) 井良沢道也: 大西山の大崩壊, 新砂防, Vol. 39, No. 1, 1986.
- 14) 土隆一: 第四紀地殻変動から見た静岡・大崩海岸の山崩れ災害, 土隆一先生記念論文集静岡の地球科学, 1972.
- 15) 渡正亮, 竹林征三, 松田六男: 真名川ダムの原石山切取法面崩壊の特性, 地すべり, Vol. 13, No. 4, 1977.
- 16) 森野亮宏, 吉川恵也, 草間一, 大脇康孝, 桜井孝, 今井篤雄: 国鉄沿線における斜面災害の実態 (2), 鉄道技術研究報告, No. 1262, 1984.
- 17) 平野昌繁, 諏訪浩, 藤田崇, 奥西一夫, 石井孝行: 1989 年越前海岸落石災害における岩盤崩落過程の考察, 京都大学防災研究所年報第 33 号 B-1, pp. 219-236, 1990.
- 18) 渡辺正幸, 中村良光, 笹原克夫: 国道 158 号猿なぎ洞門の岩盤崩壊について, 土木技術資料, 34 巻 5 号, 1992.
- 19) 日本地質学会・日本応用地質学会関西支部合同調査団: 奈良県国道 169 号法面崩壊調査報告, 2007.
- 20) 一般国道 231 号増毛道路検討委員会: 同報告書, 2009.
- 21) 北海道日本海沿岸における大規模岩盤崩落検討委員会: 同報告書, 2000.
- 22) 北海道開発局建設部道路建設課: 北海道における岩盤斜面对策工マニュアル (案), p. 2-9, (財)北海道道路管理技術センター, 2004.
- 23) 土木学会: 岩盤崩壊の考え方, 2004.
- 24) 日外勝仁, 岡崎健治, 伊東佳彦: 溶岩・火砕岩斜面における崩壊発生メカニズムの検討例, 第 12 回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp. 353-360, 2008.
- 25) 日外勝仁, 岡崎健治, 宍戸政仁, 伊東佳彦: 火砕岩地域における岩盤斜面の安定度評価に関する一考察 (その 1), 第 43 回地盤工学研究発表会講演集, pp. 1002-1003, 2008.

ARRANGEMENT OF CAUSE OF COLLAPSE AND MODELING OF COLLAPSE FORM BY ANALYZING PAST ROCK SLOPE FAILURES

Katsuhito AGUI, Masahito SHISHIDO, Syuji ANAN and Yoshihiko ITO

Considering the difference of geological features of pyroclastic rock and accretionary prism etc., the cause of rock slope collapses by analyzing the report and the datum related to rock slope collapses was extracted. Based on the results, while paying attention to the progressive factor in failures, some notes concerning the investigation of the slope stability were arranged. According to the detailed literature survey, failure phenomena were modeled after considering not only mass movement but also factor of collapse and the rock slope pattern diagrams including multiple separation sections were made.