

トッピングタイプ斜面変動の調査と対策

上野 将司*

Investigations and countermeasures for toppling type slope movement

Shoji Ueno*

Abstract

After acquiring slope information on 18 examples where toppling was generated, a method of establishing the generating mechanism and assuming the toppling depth and the stability analysis, etc. were examined. The mechanisms of the toppling failure are shown as follows.

- 1) The surface of discontinuity (plane of bedding, schistosity and fault) may have the reverse dip structure of the high angle.
- 2) Most of the slope direction and the strike of the surface discontinuity have parallel trends which have 20°-30° intersecting angle.
- 3) The slope is existed on the ridge (i.e. the slope is not surrounded by other landscape).

And the loosening of the ground by the stress release and increased pore water pressure in the underground discontinuity by rain induces the toppling failure.

In this paper, we propose the following four methods regarding the evaluation of the toppling depth.

- 1) Empirical assumption.
- 2) Presumption by measuring the displacement of the ground.
- 3) Judgment by conducting test boring investigation.
- 4) Judgment by conducting inclinometer measurement.

We evaluated the slope stability analysis based on the method of the dynamic model by Cruden (1989), we found out that its applicable condition is limited.

The effective countermeasures for achieving the stabilization for the toppling failure are to dig the ground and to drain the underground water. Only by applying the ground anchor method is not effective way to stabilize the toppling type slope movement.

Keywords: toppling, large scale collapse, reverse dip slope, uphill facing scarp, surface of discontinuity, slope disaster prevention

(要 旨)

トッピングの発生した18事例の斜面について整理した上で、その発生機構、トッピング発生深度の想定方法、安定計解析法等について検討した。トッピングの発生機構については、素因として以下の事項があげられる。

- 1) 地層の不連続面（層理面・片理面・断層面など）が高角度の受け盤構造である。
- 2) 斜面や法面の方向と不連続面の走向がほぼ平行（交角20～30°まで）である。
- 3) 斜面や法面が尾根地形（側面の拘束がなく開放された状態）である。

一方、トッピングの誘因としては、応力開放による地山の緩みの発生、および雨水の浸透による間隙水圧の発生をあげることができる。

トッピング深度の想定方法については次の4つの方法があることを示した。

- ①経験的な方法、②地表の変位量からの推定法、③ボーリング調査による方法、④孔内傾斜計の観測による方法
- 安定計算についてはCruden (1989) による力学モデルを基礎にした方法を検討したが、適用条件が限定されることがわかった。トッピング発生斜面や法面の対策には、排土と排水対策が基本であり、グラウンドアンカー等の抑止工単独の対策は効果的ではない。

キーワード: トッピング, 深層崩壊, 受け盤斜面, 山向き小屋, 不連続面, 斜面防災

* 応用地質(株)エンジニアリング本部

* OYO Corporation

1. まえがき

自然斜面（以下、斜面）や人工斜面（以下、法面）と地質の不連続面（層理・片理・節理・劈開・断層等）との関係について、流れ盤構造と受け盤構造に区分するとき、一般に受け盤構造は流れ盤構造に比較して安定性が高いと考えられている。しかし、不連続面が急傾斜で受け盤構造の場合に、斜面や法面でトップリングに起因する変状や崩壊の発生が認められる。とくに付加体と呼ばれる地層の分布域や断層沿いの地域では層理面等の不連続面が急傾斜する場合が多く、斜面や法面でのトップリングの発生が目立つ。

トップリングの発生した斜面や法面では特徴的な微地形として、平行する山向き小崖が多数認められ、斜面の頂部には細長い凹地（線状凹地）が認められる場合もある。地形断面は鋸歯状になり、ボーリング調査では地中に開口亀裂が確認できる場合があり、斜面や法面の地山には緩みを生じる。とくに切土法面の施工では掘削の最終段階で急速なトップリングが発生することがあって、施工上の手戻りが大きく深刻な問題になる。

一方、斜面でも高知県の加奈木崩れ、静岡県赤崩など、大崩壊地の背後や隣接する斜面にはトップリングタイプの岩盤クリープが認められることから、長期的なトップリングの進行は近年、「深層崩壊」と呼ばれるようになった大規模な崩壊の前兆と考えられる。トップリングは植生の繁茂した斜面や法面では明瞭な変状として確認しにくいので現地踏査で見落とされることがある。このため、斜面や法面が突然に急速な崩壊をしたように思われているいくつかの例^{1).2).3)}は、トップリングを前駆現象とする斜面変動が素因としてあったものと推察する。

これまでに筆者はトップリングの発生した斜面・法面9事例について検討し、危険な斜面・法面の特徴について示した⁴⁾。これに7事例のトップリング発生例を加えて追加検討⁵⁾を行った。本文では更に2事例を加えて、切土法面の安定検討や変状対策等を含めた実務的な観点から検討を行ったものである。

2. トップリングの形態区分

Goodman と Bray⁶⁾ は、トップリングの形態を次のように区分している。

- ① たわみ性トップリング (flexural toppling)
- ② ブロックトップリング (block toppling)
- ③ ブロックのたわみ性トップリング (block flexure toppling)
- ④ 二次的なトップリング (Secondary toppling modes)

このうち①たわみ性トップリングとしては、小規模ではあるが千木良⁷⁾や横山・柏木⁸⁾が示した形態が典型的な例として挙げられる。

②ブロックトップリングはFreitas と Watters⁹⁾,

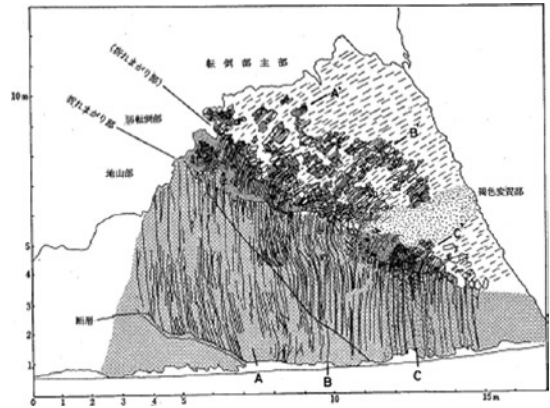


図-1 たわみ性トップリングの例 (1)⁷⁾
Fig. 1 The example of flexural toppling (1)

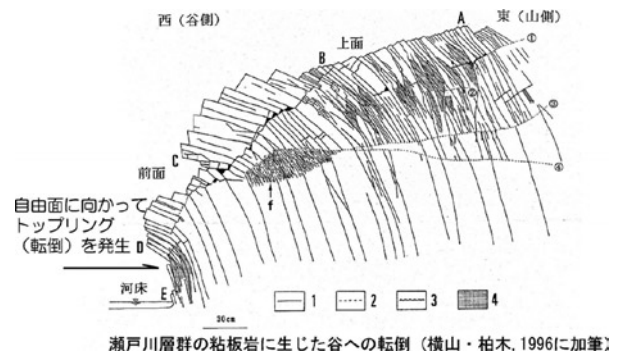


図-2 たわみ性トップリングの例 (2)⁸⁾
Fig. 2 The example of flexural toppling (2)

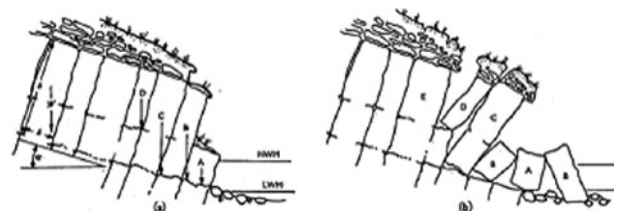


図-3 ブロックトップリングの例 (1)⁹⁾
Fig. 3 The example of block toppling (1)

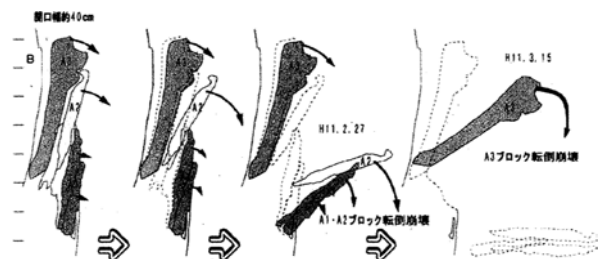


図-4 ブロックトップリングの例 (2)¹⁰⁾
Fig. 4 The example of block toppling (2)

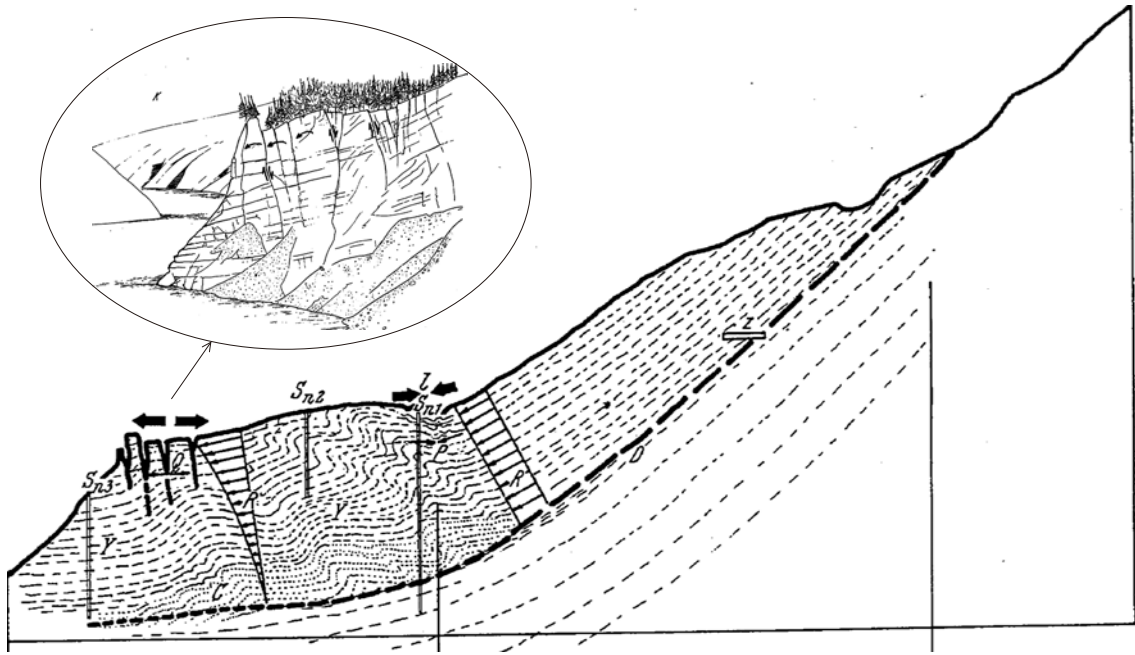


図-5 二次的トップリングの例 (バイオントダム の地すべり)¹²⁾

Fig. 5 The example of secondary toppling (The landslide of Vajont dam)

および門間ほか¹⁰⁾の図が代表的な例としてあげられ、大小の落石の発生形態としても多く認められる。新津¹¹⁾は主にこのブロックトップリングについて詳細な検討を行っている。③は両者の中間的な形態であり、実例では①と②のいずれかに分類されるものと考えられる。④二次的なトップリングについては、図-5¹²⁾に示すような大規模な地すべりでの局所的な変動があげられ、中小規模の地すべりでも観察される現象である。

以上のトップリングの形態のうち、本文では①および③を対象に一括してたわみ性トップリングとし、事例を示し検討を進める。

3. 事例

3.1 事例リスト

トップリング事例について筆者の経験に文献資料を加えて規模・不連続面の傾斜・斜面や法面の傾斜等を整理して表1に示した。地質的には層理面や片理面の発達する地層に発生しやすいことが認められるが、マサ状風化した地質でも平行する粘土シーム層が不連続面になって発生することがある。トップリングの及ぶ深さは切土施工では比較的浅いものと考えられるが、自然斜面では40 mに及ぶものがある。変動域が深い場合には、単にトップリングと呼ぶよりは「重力性曲げ褶曲」と呼ぶことが適切な感じがする。

表-1 トップリング事例一覧表

Table 1 The form list of toppling slopes

No	地区名	区分	変状または崩壊の規模(m)			傾斜角(°)		地質
			斜面長	幅	深度	地層傾斜(α)	地表面(β)	
1	香川県まんのう町首切峠	切土(施工中)	47	60	9	-60	38	強風化花崗岩
2	高德線白鳥引田間	切土(供用後)	70	60	13	-70	35	砂岩・頁岩
3	高松道鳴門1	切土(施工中)	11	20	2	-53	40	砂岩・頁岩
4	高松道鳴門2	切土(施工中)	20	20	3	-50	40	砂岩・頁岩
5	松山道伊予市三秋	切土(施工中)	60	75	16	-70	38	砂岩・頁岩
6	愛媛県久万高原町露峰	切土(供用後)	110	90	30	-60	30	黒色片岩・緑色片岩
7	愛媛県八幡浜市	切土(施工中)	90	95	20	-65	25	黒色片岩・緑色片岩
8	山口県宇部市	切土(施工中)	20	67	2	-75	50	緑色片岩・黒色片岩
9	北海道知内町	切土(施工中)	85	200	18	-72	40	頁岩・砂岩・凝灰岩
10	北関東道足利市A地区	切土(施工中)	30	140	18	-80	40	頁岩・砂岩
11	北関東道足利市B地区	切土(施工中)	30	50	5	-85	40	頁岩・砂岩
12	山梨県塩の山	自然斜面	300	360	40	-60	40	粘板岩・砂岩・チャート
13	中国道姫路市	切土(施工中)	80	100	14	-55	40	粘板岩・砂岩・チャート
14	高知県中土佐町久礼	切土(供用後)	35	60	6	-50	60	頁岩・砂岩
15	高知県四万十市	切土(施工中)	80	130	14	-80	45	頁岩・砂岩
16	高知県宿毛市	自然斜面	120	160	30	-70	36	頁岩・砂岩・石英斑岩
17	大分県A地区	自然斜面	160	120	31	-75	45	砂岩・頁岩
18	熊本県球磨村	自然斜面	190	250	40	-50	50	砂岩・頁岩・チャート

筆者は新設道路の切土法面の施工時の調査において、ある地点でトップリングによる被害が生じると隣接地区で同様の被害が連鎖的に発生することを数地区で経験した。この理由は次のように考えられる。トップリング発生の素因は不連続面の地質構造が急傾斜を呈する箇所であり、そのような地質構造の近傍には断層が存在することが多い。断層沿いは浸食されやすく山間部にあつては直線状の谷地形（明瞭なりニアメント）を形成し格好の交通路となる。この結果、道路の計画ルートは断層沿いに設定されることが多く、同様な地形・地質構造の法面が計画されてトップリングが同一ルート上で発生しやすくなる¹³⁾。

3.2 事例

トップリング事例は、不連続面が受け盤構造になる斜面や法面で発生したもので、筆者が関係した調査事例12件と文献資料6件（事例5, 8, 9, 12, 13, 18）を加えた18件について整理した。以下に各事例について要約する。

（事例1）香川県首切峠¹⁴⁾

地質は領家帯のマサ化した強風化花崗岩であり、法面勾配1:1.0で直高25m（平均傾斜38°）ほど切下がった時点で法面変状が発生した。変状は法面の方向とはほぼ同じ走向で花崗岩中に貫入した数条の白色粘土脈に沿って落差20cm程度の山向き小崖が5~6段発生したものである。白色粘土脈の平均的な傾斜は60°であり、法面変状の範囲は斜面長47m、幅60mであった。変状の及んだ深度は断面図から9mと想定した。

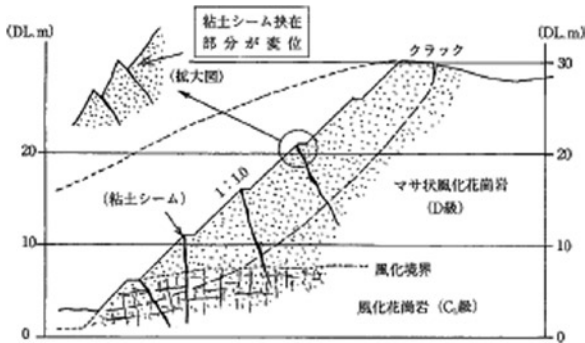


図-6 マサ状風化花崗岩の法面変状（事例1）¹⁴⁾
Fig. 6 Toppling occurs in weathering granite slope. (Case 1)

（事例2）高徳線白鳥引田間¹⁴⁾

国鉄（現 JR 四国）高徳線の尾根部を切土した法面の点検の際（昭和47年11月）に、標高55mの山頂部で延長40m、最大開口幅50cmのクラックとこれに平行する2本のクラックが確認された。このため地すべり伸縮計を設置するとともに、ボーリング等の地質調査が行われ対策工の準備が進められていた。しかし昭和49年7月6日午前4時から降り始めた雨は翌7日午前1時に連続雨量381mm（最大時間雨量70mm）

に達する記録的豪雨となり、法面を含む斜面は午前1時10分に崩壊するに至った。

地質は和泉層群基底部に近い砂岩優勢の砂岩頁岩互層であり、斜面は北東向き、地層の走向傾斜はN80°W, 70°Sで、法面との関係は受け盤である。法面変状の範囲は斜面長70m、幅60mであり、変状の及んだ深度はボーリング調査結果をもとにした地質断面図から13mと想定した。

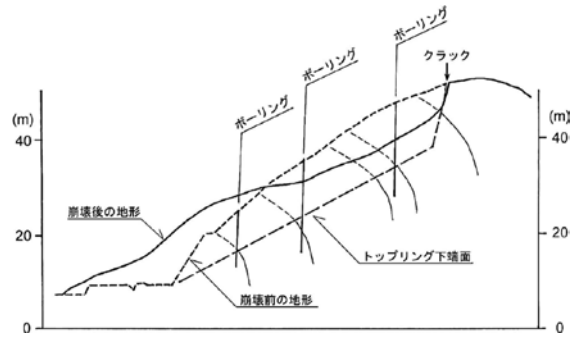


図-7 砂岩・頁岩互層の崩壊（事例2）¹⁴⁾
Fig. 7 Toppling occurs in rock slope with steeply dipping bedding planes. (Case 2)

（事例3, 4）高松自動車道鳴門¹⁵⁾

地質は和泉層群の比較的新鮮な砂岩頁岩互層であり、切土施工がいずれも下段法面に達した直後に3箇所の法面で変状が発生した。このうちの変状は次のとおりである。変状形態は、下部法面の破碎部分がクサビ状にせり出し、上部法面の地層が将棋倒しのように倒れ込んだものである。法面（平均傾斜40°）に対して層理面傾斜は48~63°とばらつきがあるが、平均的な傾斜は53°および50°程度の受け盤構造である。法面変状の範囲は斜面長11mと20m、幅は両者とも20mであり、変状の及んだ深度は転倒変位角と法面の変位状況から、それぞれ2m、3mと想定した。なお、この変状は連続雨量65mmの降雨時に発生した。

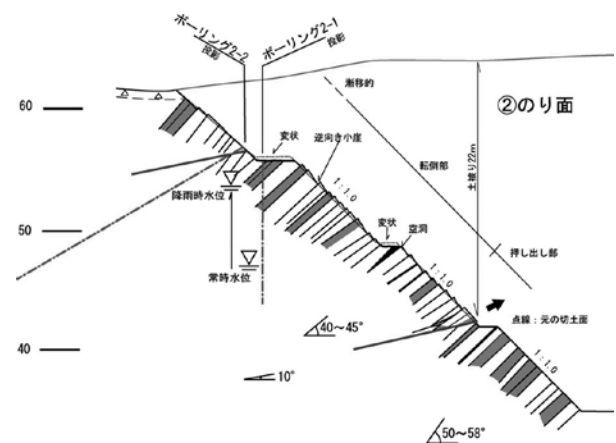


図-8 砂岩・頁岩互層の法面変状（事例3）¹⁵⁾
Fig. 8 Toppling occurs in rock slope with steeply dipping bedding planes. (Case 3)

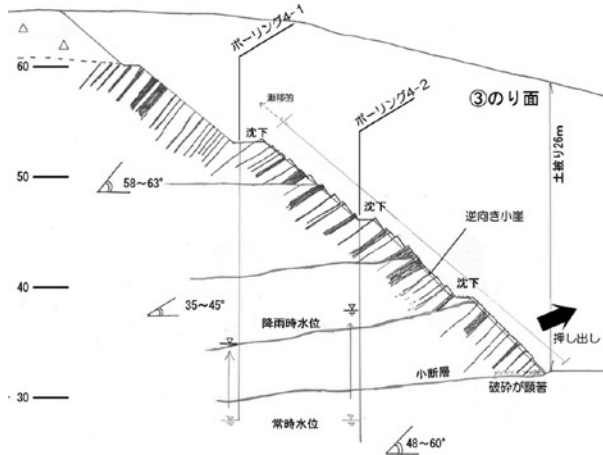


図-9 砂岩・頁岩互層の法面変状 (事例4)¹⁵⁾
 Fig. 9 Toppling occurs in rock slope with steeply dipping bedding planes. (Case 4)

(事例5) 松山自動車道伊予市三秋¹⁶⁾・¹⁷⁾

地質は和泉層群の砂岩頁岩互層であり、4段の切土法面(勾配1:0.8~1:1.2)と最下段のブロック積み法面(勾配1:0.5)とする計画で切土が施工された。切土が最下段に達した直後に斜面長60m、幅75mの範囲で多数の山向き小崖を含む法面変状が発生した。地層傾斜は法面(平均傾斜38°)に対して平均的に70°の受け盤構造であり、変状後の傾斜は48~56°である。変状の及ぶ深度はボーリング調査と孔内傾斜計観測結果をもとに16mとされる。

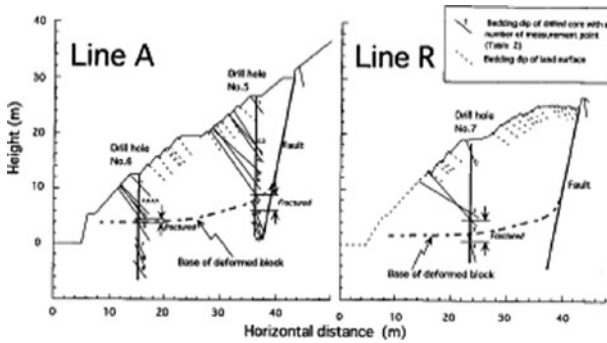


図-10 砂岩・頁岩互層の法面変状 (事例5)¹⁷⁾
 Fig. 10 Toppling occurs in rock slope with steeply dipping bedding planes. (Case 5)

(事例6) 愛媛県久万高原町露峰¹⁸⁾

地質は三波川帯の黒色片岩主体として緑色片岩を挟在する。尾根部を切土した既往の法面上部5段は勾配1:0.8~1:1.0、最下段の6段目は擁壁で勾配1:0.5となっている。切土施工は約20年前に行われたものであるが、平成14年1月7日に突然法面にクラック等の変状が発生し、法面上部の斜面を含んだ範囲で多数の山向き小崖が形成された。変状範囲は斜面長110m、幅90mに及び、法尻から頭部クラックまで

の平均傾斜は30°である。片理面の走向は法面とほぼ平行でN75°E、傾斜は60°Nで、法面と片理面の関係は受け盤構造になるが、法面上部や斜面では片理面傾斜が30°程度まで緩くなっており、地山内部でのクリープ変形の進行が確認されている。この変状の及ぶ深度はボーリング調査と孔内傾斜計観測結果をもとに30mとされる。

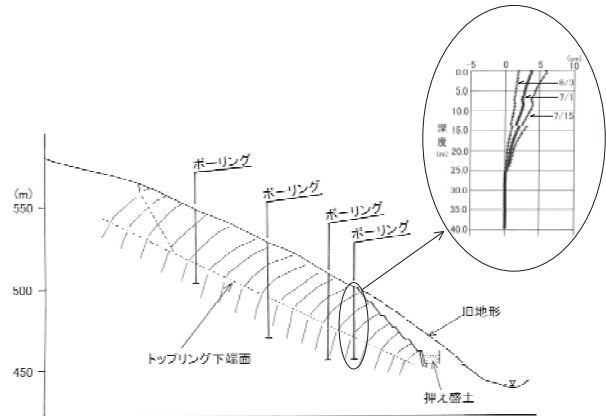


図-11 結晶片岩の法面崩壊 (事例6)¹⁸⁾
 Fig. 11 Toppling occurs in rock slope with steeply dipping bedding planes. (Case 6)

(事例7) 愛媛県八幡浜市¹⁹⁾

地質は三波川帯の黒色片岩主体で緑色片岩を挟在する。宅地造成のために尾根部を大きく掘削造成する工事に伴って切土法面が施工された。法面は直高30mで上部5段の勾配が1:1.2、最下部は勾配1:0.5で擁壁が計画されていた。掘削途中では微小クラックの発生など変状が見られたが、最下部法面の掘削直後に法面および背後斜面に多数の山向き小崖が発生した。片理面の走向は法面とほぼ平行のEW方向、傾斜は60~70°Sで法面との関係は受け盤構造である。変状範囲は斜面長90m、幅95m、変状の及ぶ深度はボーリング調査と孔内傾斜計観測結果をもとに20mとされた。

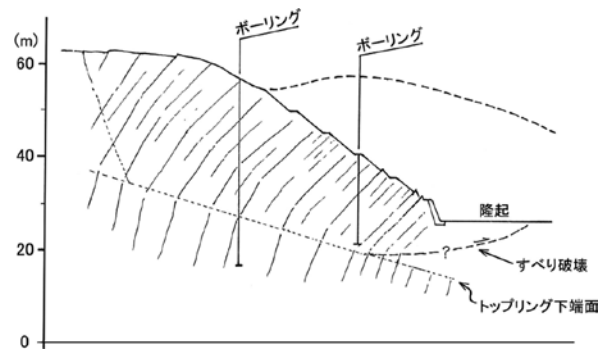


図-12 結晶片岩の法面変状 (事例7)¹⁹⁾
 Fig. 12 Toppling occurs in rock slope with steeply dipping bedding planes. (Case 7)

(事例8) 山口県宇部市²⁰⁾

地質は三郡変成帯の緑色片岩を主体とし泥質片岩を挟在する。土地造成に伴う掘削で、高さ16m、のり勾配1:0.8の切土法面が施工されたが、集中豪雨後に山向き小崖を含む変状が発生した。片理面の傾斜は75°で法面との関係は受け盤構造であり、変状範囲は斜面長20m、幅67m、変状の及ぶ深度は2m程度と推定される。(断面図なし)

(事例9) 北海道知内町²¹⁾

地質は新第三紀の木古内層であり頁岩を主体とし砂岩や凝灰岩を挟在する。林道建設に伴う切土法面の施工で、勾配1:0.8、切土の規模は法尻の奥行き最大7m、高さ12m、延長220mで掘削施工が行われた。地層の傾斜は河床の新鮮な部分で70~80°で急傾斜であり、法面とは受け盤の関係になる。この掘削直後に6段の山向き小崖が発生し、法面は4m程度前面に押し出す形となった。この斜面変状は法面の上方斜面を含む斜面長85m、幅200mの範囲に及び、変状の及ぶ深度はボーリング結果から18mとされた。

び下部法面2段(勾配1:1.0)の5段目(断面図では3段目)まで切り下がった段階(平均傾斜40°)で連続雨量69mmの降雨があり、法面の東側半分範囲に多数の山向き小崖(高さ20cm程度)が発生した。変状範囲は幅50m、変状の及んだ深度は地質断面図から5mと想定された。トップリングは法面東半分の低い部分にとどまったのであるが、その理由は南北方向に延びる小断層で縁切れしたためである。

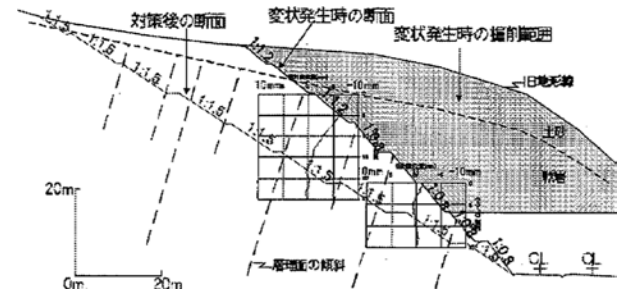


図-14 砂岩・頁岩互層の法面変状(事例10)¹³⁾
 Fig. 14 Toppling occurs in rock slope with steeply dipping bedding planes. (Case 10)

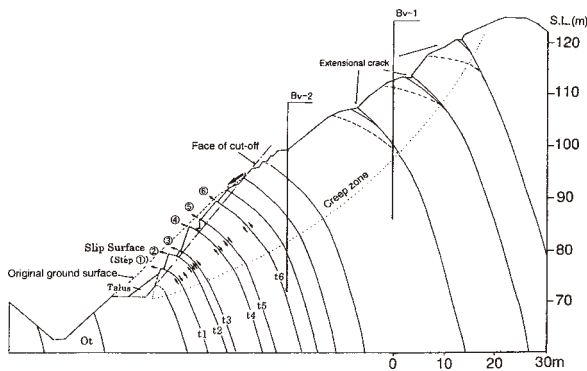


図-13 頁岩・砂岩・凝灰岩互層の法面変状(事例9)²¹⁾
 Fig. 13 Toppling occurs in rock slope with steeply dipping bedding planes. (Case 9)

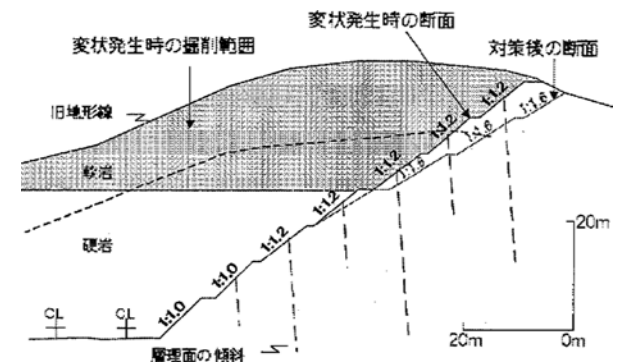


図-15 砂岩・頁岩互層の法面変状(事例11)¹³⁾
 Fig. 15 Toppling occurs in rock slope with steeply dipping bedding planes. (Case 11)

(事例10) 北関東自動車道足利市A¹³⁾

地質は中生層の砂岩・頁岩互層で、尾根を横断する方向で高速道路が計画され法面8段(直高55m)の切土施工に着手した。上部法面3段(勾配1:1.2)および下部法面5段(勾配1:0.8)の7段目まで切り下がった段階(平均傾斜40°)で小段に平行な方向にクラックが多数発生した。この3か月後の連続雨量122mmの降雨により小段に平行な方向に落差10cm程度の山向き小崖が多数発生した。変状範囲は幅140m、変状の及んだ深度は孔内傾斜計の測定結果から最大18mである。

(事例11) 北関東自動車道足利市B¹³⁾

事例10から約7km東方に位置し、地質は同じ中生層の砂岩・頁岩互層である。尾根を横断して東西方向の高速道路計画で北向き法面9段(直高60m)の切土施工に着手した。上部法面7段(勾配1:1.2)およ

(事例12) 山梨県塩の山²³⁾

急峻な山地の尾根先端の南西向き傾斜40°の斜面で、地質は中生界の粘板岩・砂岩・チャートからなる互層である。1923年関東地震の際に大崩壊が発生、近年では1995年から2001年にかけて小崩壊を繰り返しており不安定化した斜面である。地層の走向はWNW-ESE方向で斜面とほぼ平行、傾斜は斜面末端の河床部で60~70°の受け盤、尾根部では10~30°の受け盤構造である。この点とボーリング調査の結果から、深度40m付近までトップリングタイプの変動が確認された。斜面の変状幅は360m、斜面長は300mである。

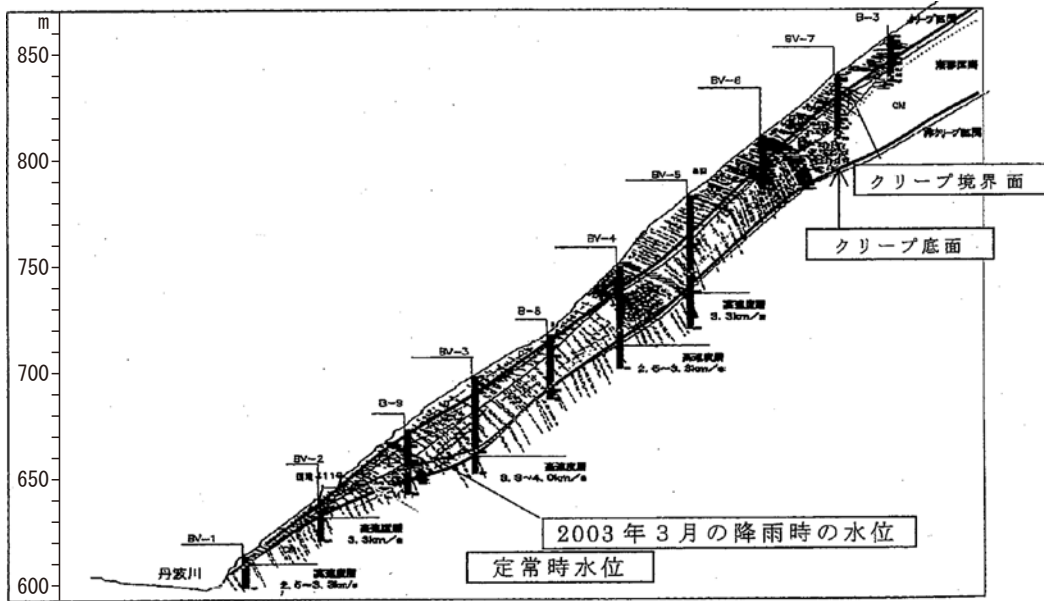


図-16 粘板岩・砂岩・チャート互層の斜面変動 (事例12)²²⁾

Fig. 16 Toppling occurs in rock slope with steeply dipping bedding planes. (Case 12)

(事例13) 中国自動車道姫路市²⁴⁾

中国自動車道は姫路市北部で山崎断層沿いに建設されている。この道路の建設時に尾根部の切土を行ったところ法面に平行する多数のクラックが発生して法面が不安定化した。地質は粘板岩を主体として砂岩やチャートを挟む古生層で、山崎断層の影響で破碎されており走向は道路や断層方向に一致し、傾斜は55° Sで法面(平均傾斜40°)との関係は受け盤である。法面は直高約40m、勾配は上部5段が1:1.2~1:1.0、最下段は1:0.6として施工された。上部5段の法面は植生やコンクリート吹付け工で保護され、最下段の掘削とブロック積施工が終わった直後に、法面と周辺斜面に多くのクラックが発生した。この変状範囲は幅100m、法尻からの水平距離80m、変状の及ぶ深度はボーリング調査等から14mと推定された。

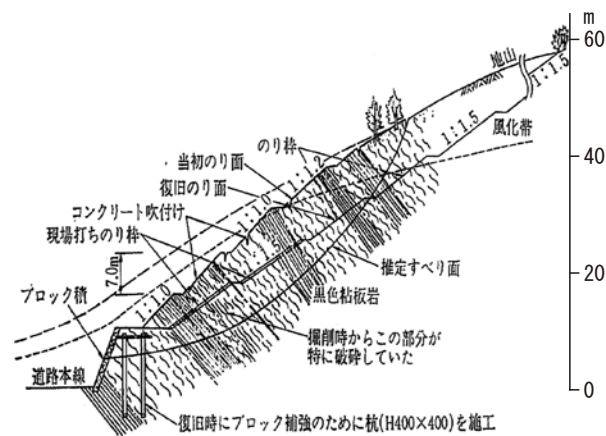


図-17 粘板岩・砂岩・チャート互層の法面変状 (事例13)²³⁾

Fig. 17 Toppling occurs in rock slope with steeply dipping bedding planes. (Case 13)

(事例14) 高知県中土佐町久礼¹⁴⁾

施工後10年以上を経た尾根を横断する道路の切土法面において、降雨や地震のような誘因が無い状況下で崩壊が突然発生して道路が埋没した。地質は四万十帯に属する頁岩と砂岩の互層であり、地層の走向はほぼ法面方向、傾斜は50°で受け盤になっている。法面は直高約30m、勾配1:0.5(平均傾斜60°)で、モルタル吹付けにより保護されていた。崩壊規模は幅60m、深さ3~7m、崩壊土量は約1万m³である。

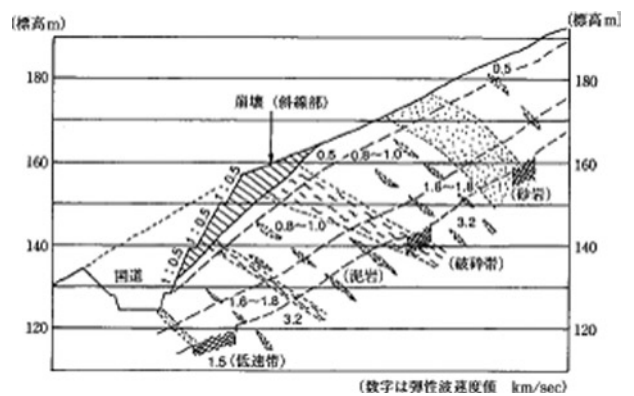


図-18 頁岩・砂岩互層の崩壊 (事例14)¹⁴⁾

Fig. 18 Toppling occurs in rock slope with steeply dipping bedding planes. (Case 14)

(事例15) 愛媛県四万十市中村²⁵⁾

尾根状斜面において新設道路の工事で切土を行ったところ、法面に最大高さ1.5mの山向き小崖が多数発生し、トッピング特有の鋸歯状の変状を来した。地質は四万十帯に属する頁岩優勢砂岩頁岩互層であ

り、層理面や小断層面等の不連続面の走向は N60 ~ 74° E、傾斜 75 ~ 85° S である。これらの走向は切土法面の方向と概ね平行であり法面との関係は受け盤になる。切土法面は、直高 44 m (7 m × 5 段 + 9 m × 1 段)、勾配 1:1.0、幅 130 m である。法面変状は、破碎質泥岩が分布する最下段の切土が完了した直後、連続雨量 86 mm の降雨により法面全体に発生した。変状の及ぶ深度はボーリング結果と孔内傾斜計観測結果等をもとに 14 m とされた。また変状発生直後に設置した地盤伸縮計によると、変位速度は 5.0 mm/h であったが緊急の押え盛土をすることにより 0.02 mm/h 程度まで収束した。

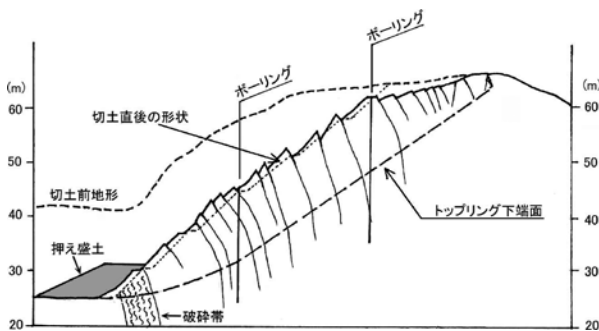


図-19 頁岩・砂岩互層の法面変状 (事例 15)²⁴⁾
 Fig. 19 Toppling occurs in rock slope with steeply dipping bedding planes. (Case 15)

(事例 16) 高知県宿毛市

地質は四万十帯の頁岩主体で薄い砂岩層を挟み、地層の走向は尾根の延びの方向に直交し、傾斜は 60 ~ 70° の受け盤構造である。層理面沿いには層厚 10 ~ 20 m 程度の連続性の良い石英斑岩が貫入する。尾根部のボーリング調査結果で、深度 30 m 付近まで層理面が 50° 前後まで緩くなっていること、深部に達する流入粘土の存在や掘進時の漏水が著しいこと、尾根部の踏査では層理面が 40° 程度の傾斜であることなど、クリープ変動による地山の緩みが確認された。

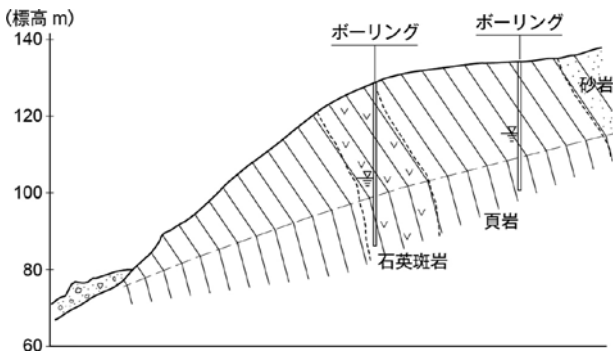


図-20 頁岩・石英斑岩の斜面変動 (事例 16)
 Fig. 20 Toppling occurs in rock slope with steeply dipping bedding planes. (Case 16)

(事例 17) 大分県 A 地区

尾根の延びの方向が地質の走向にほぼ一致する傾斜 45° の急峻な斜面で、尾根上には線状の凹地が形成されている。斜面を構成する地質は中生界の硬質な砂岩層を主体に薄い頁岩層を挟み、傾斜 75° の受け盤構造をなす。急峻な斜面には砂岩の露岩部が多く、浮石となって不安定化しており径 1 ~ 2 m の落石が発生している。ボーリング調査では新鮮な砂岩層の中に空洞が確認され、孔内傾斜計観測では最大深度 31 m からの傾斜変動が確認された。斜面変動は両端が崩壊地で挟まれた範囲の幅 120 m であり、その長さは尾根部の凹地から斜面裾部に至る 160 m である。

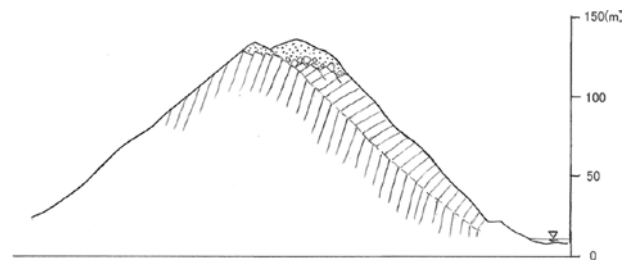


図-21 砂岩・頁岩互層の崩壊 (事例 17)
 Fig. 21 Toppling occurs in rock slope with steeply dipping bedding planes. (Case 17)

(事例 18) 熊本県球磨村²⁵⁾

凸状の地形をなす傾斜 50° の急斜面の末端で昭和 61 年 10 月 12 日、崩壊が発生して 34,000 m³ の大量の土砂で国道が埋め尽くされ、国道は半年間通行止めになった。この崩壊は 9 月 21 日までの累積雨量 211 mm の影響があったと推定されている。11 月 10 日には 1,500 m³ の 2 次崩壊があって崩壊地が上方に拡大した。この上部には斜面に平行に最大幅 80 cm、最大落差 70 cm の開口亀裂が延長 100 m にわたって発生し、さらに大規模な斜面が不安定化していることがわかった。調査の結果、その規模は幅 250 m、斜面長 190 m、深さ 30 ~ 40 m と確認された。地質は中生界の砂岩・頁岩・チャートの互層であり、地層は山側に 50° 傾斜する受け盤構造である。斜面変動は継続したが応急対策の押え盛土を行った後は変位は減少した。

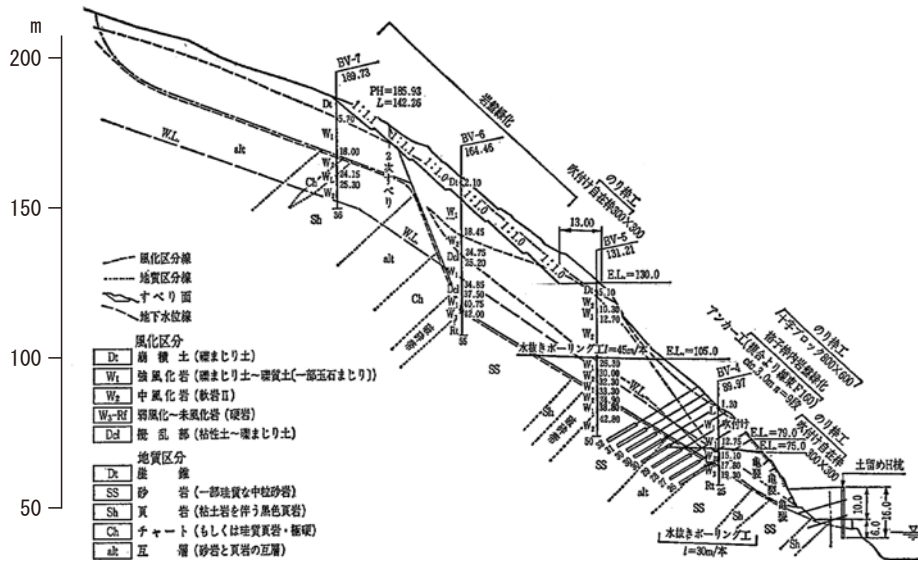


図-22 砂岩・頁岩・チャート互層の崩壊 (事例18)²⁵⁾

Fig. 22 Toppling occurs in rock slope with steeply dipping bedding planes. (Case 18)

4. トップリングに関する検討

4.1 危険な斜面と法面

斜面や法面のトップリング事例から共通する点を拾い出すと次のような事項が挙げられる。

- ① 地質は層理面や片理面等の不連続面が発達する中古生層の堆積岩や変成岩が主体であり、新期の堆積岩や風化変質した花崗岩が各1例ある。
- ② 不連続面が急傾斜の受け盤構造である。
- ③ 地形的な特徴は両側に拘束の無い尾根の斜面や法面で発生している。
- ④ 法面では切下がった段階での脆弱部や急勾配部分の掘削後の変状発生が目立つ。

また、切土施工中に急速なトップリングの発生した法面が多いが、切土後やや時間をおいてトップリングによる崩壊が発生した法面があり、斜面では長期的なクリーブ変動によるトップリングの進行が認められる。

施工中の切土法面では降雨時に急速なトップリングの発生被害を受けた事例が目立つ。

次に、上記の②の事項に着目して、トップリングが発生した斜面や法面(表-1)の傾斜と層理面等の不連続面の傾斜の関係を図-23に示した。この図からトップリングの発生した斜面や法面のプロットはA線以上の領域に分布する。すなわち、トップリング発生の危険な斜面や法面は「不連続面の傾斜が斜面や法面に対して垂直に交わる角度以上に急な場合」である。この領域がトップリングの発生しやすい不安定領域にあたる。なお、不連続面の走向と法面の延長方向の交角については表1には示していないが、いずれも20°以内であり両者はほぼ平行する関係にある。この交角が大きくなると変状形態はクサビすべり等に移行し、トップリングは発生できなくなるので、この程度の交角までがトップリングの発生しやすい条件になる。

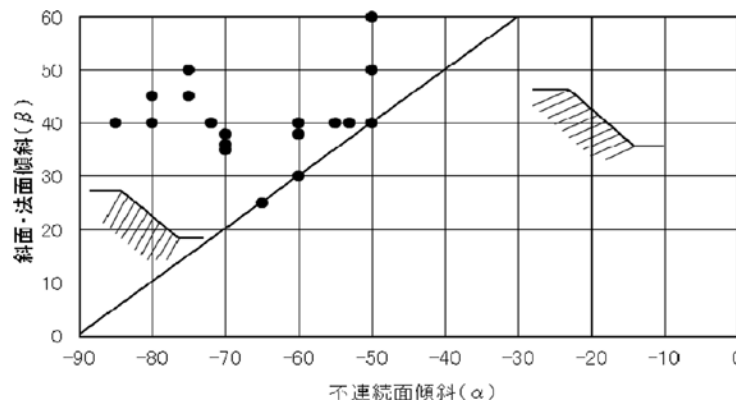


図-23 トップリングの発生した受け盤斜面・法面の領域

Fig. 23 Relationship between the inclination of toppling generating slopes (β), and the inclination of surface of discontinuity (α).

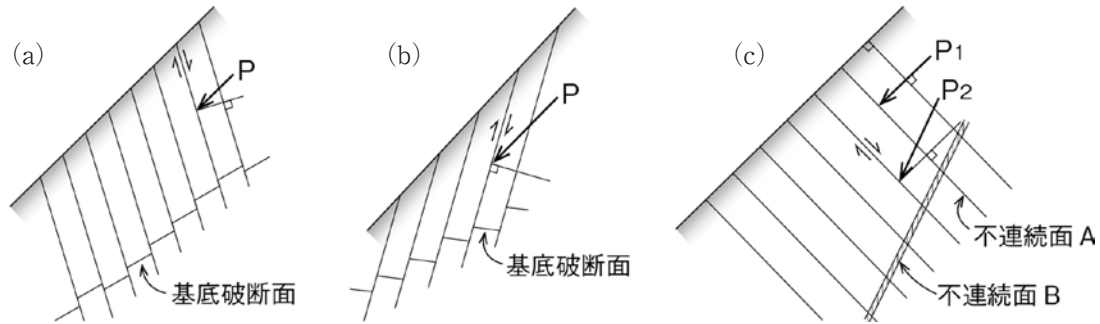


図-24 斜面の応力と不連続面に作用するせん断力
 Fig. 24 Stress of a slope, and shear stress of acting on a surface of discontinuity.

ところで、トップリングの発生した斜面や法面の傾斜と不連続面との関係を示した図-23において、A線以上の領域とは図-24(a)および同図(c)にあたる。しかし、Cruden²⁶⁾は同図(b)の構造でもトップリングの発生が認められることを示している。鈴木²⁷⁾が逆目盤と呼ぶ構造で、斜面ではこのタイプのトップリングが認められるようであるが筆者のあげた事例では存在せず、図の(a)に比べてトップリングが起りにくい構造といえる。

トップリングの発生は図-24(a)(b)に示すように、応力(P)の方向を斜面と平行に考えて不連続面にせん断力が作用することで説明される。しかし、図-23のA線上に位置するトップリング事例、すなわち図-24(c)のように斜面と不連続面(A)が直交する場合には同じ応力(P1)の作用方向ではせん断力は働かずトップリングは発生しないことになる。これではA線上のトップリング事例を説明できないので、すべり面のような不連続面(B)があって応力(P2)が不連続面(A)にせん断力を作用させるものと考えられる。この点については安定検討の部分で再度言及する。

次にトップリングの発生事例の特徴を考慮して、地表地質踏査の段階でトップリングの恐れのある斜面を見出すポイントについて説明する。切土施工中の法面のように地質や不連続面の走向・傾斜の全容を見ることはできないので、地質が露出する崖などで不連続面の走向・傾斜を測定して推定することになる。地形については尾根や凸状斜面に注意し、地質については不連続面の走向・傾斜が斜面や計画法面に急傾斜受け盤になる部分で注意深い観察が必要になる。とくに不連続面が斜面上部と斜面裾部あるいは谷部で変化するかどうか多くの露頭で測定することが重要になる。図-25(a)(b)に示すように尾根と谷の不連続面の測定結果を断面図上に合成すれば、不連続面の傾斜変化の状況から斜面内部のトップリングの存在を想定することができる。このような構造は地殻変動に起因する褶曲の場合があるが、トップリングが原因の場合は著しい緩みや風化作用が深部まで及んでいること、周辺の地質構造との関係を基にして区別は可能である。この意

味から比較的広い範囲を対象に調査すべきである。

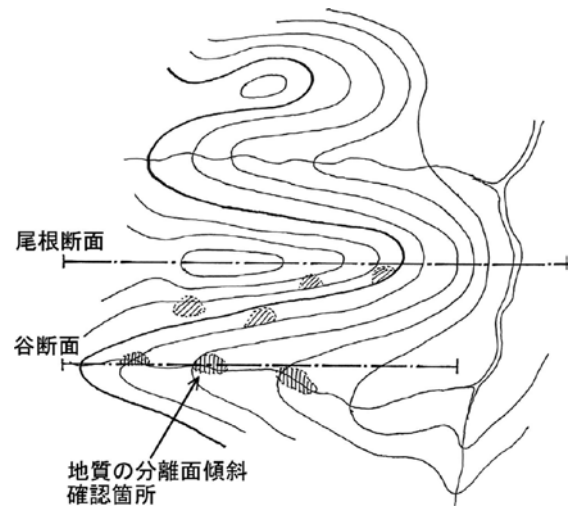


図-25(a) 尾根と谷での不連続面の調査
 Fig. 25(a) Survey of the surface of discontinuity for a valley.

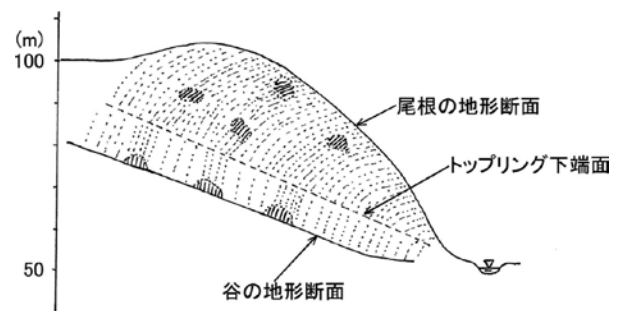


図-25(b) 尾根と谷の地質断面の合成
 Fig. 25(b) Toppling of the surface of discontinuity shown in a geological profile.



写真-1 尾根部における地形の転倒状況
Photo. 1 Situation of toppling of the stratum in a slope.

4.2 トップリングの基底深度

斜面や法面ではトップリングが発生すると対策を検討する上で変状の基底深度が大きな問題になる。トップリングの基底深度の推定法について、筆者は概略を報告²⁸⁾したが、ここでは簡易な方法を含めてやや詳しく説明する。

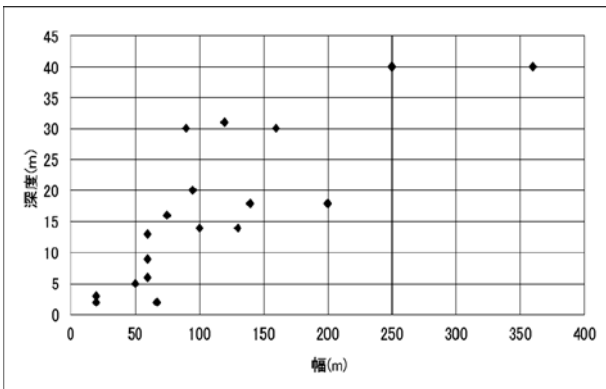


図-26 トップリング発生斜面の変状幅と深度の関係
Fig. 26 Relationship between width and depth of toppling slope.

筆者は地すべりの形状について、経験的にある形状比の範囲にあることを報告した²⁹⁾。その結果から、地すべりのすべり面深度の想定には横断方向の形状比が有効であることが確かめられているので、この形状比がトップリング発生斜面にも適用できるかどうか確認した。表-1のトップリング事例の横断方向の形状は図-26のようであり、以下に示す地すべり形状比と違いがないことがわかった。

地すべりの横断形状比：幅／深度 = 3.0 ~ 10.7

たとえば地表でのトップリング発生範囲が幅 100 m であれば、その基底深度はやや幅があるが 9 ~ 33 m の範囲との目安を得ることができる。

(2) 地表変状からの概略想定

トップリングが発生した場合、層理面等の不連続面の傾斜角変位は、「変状範囲外の不連続面の傾斜（急

傾斜）」と「変状範囲内の不連続面の傾斜（緩傾斜）」の差から求められる。法面であればトップリングによる前方への変位量は測量によって求められるので、不連続面の傾斜角変位との関係からトップリング基底深度の概略について図示するような検討で容易に求められる。

すなわち、トップリング基底深度を支点にして不連続面が傾斜角の変化分だけ板状に回転したと仮定して地表での変位量が発生するものとする。地表での変位量を円弧と同じとみなして、円弧の半径を求めるとトップリングの基底深度を近似的に求めることができる。

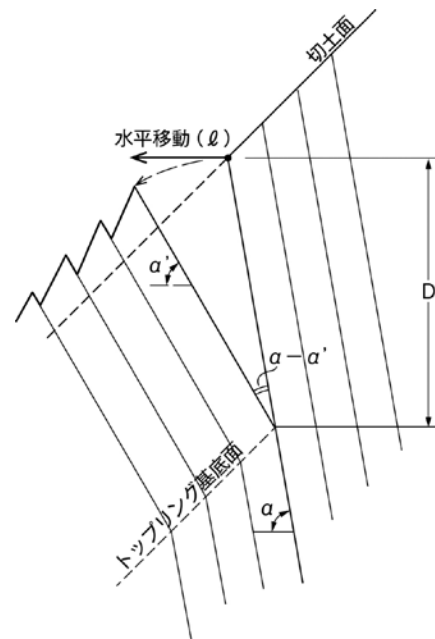


図-27 地表変位からトップリング深度の推定
Fig. 27 Depth of toppling presumed from surface displacement.

図示するように地表の変位量 (ℓ) と不連続面の傾斜角の変化 (α - α') を確認できれば、次式から概略のトップリング基底深度 (D) が求められる。

$$\pi D (\alpha - \alpha') / 180 \approx \ell$$

この方法は浅い深度であれば精度は高いが、一般にはたわむ様な変形になるため深部ほど傾斜角変位が小さくなり、トップリングの基底深度が深い場合は精度が落ちる。

(3) ボーリング調査による判定

不連続面の傾斜角はトップリング基底深度を境にしてそれ以深よりも浅い部分では緩くなる。また、トップリング発生区間では地山内部の変位による地質の破碎や、空隙の発生などで透水性が良い。これらの点から、ボーリング調査によるトップリング発生深度の推定では、①ボーリングコアにおける層理面等の不連続面の傾斜角度の変化、②コア形状（破碎状況）の変化、③ボーリング掘進時の送水量の変化（漏水状況）に着

目する必要がある。

図は事例 15 の測定結果であり、ボーリングコアの不連続面（層理面）の傾斜角度を示したもので、あわせて孔内水位や後述の孔内傾斜計によるトッピング変位の基底深度等を示した。不連続面の傾斜は深部において一部を除くと 67～86°、浅い部分で 55～65°と比較的明瞭な差が認められることから、トッピングの基底深度を 14 m 付近に想定することが出来る。また、ボーリング掘進中の漏水の激しい箇所も地表から深度 14 m 付近までの区間であり、トッピングによる透水性の変化を反映するものとなっている。

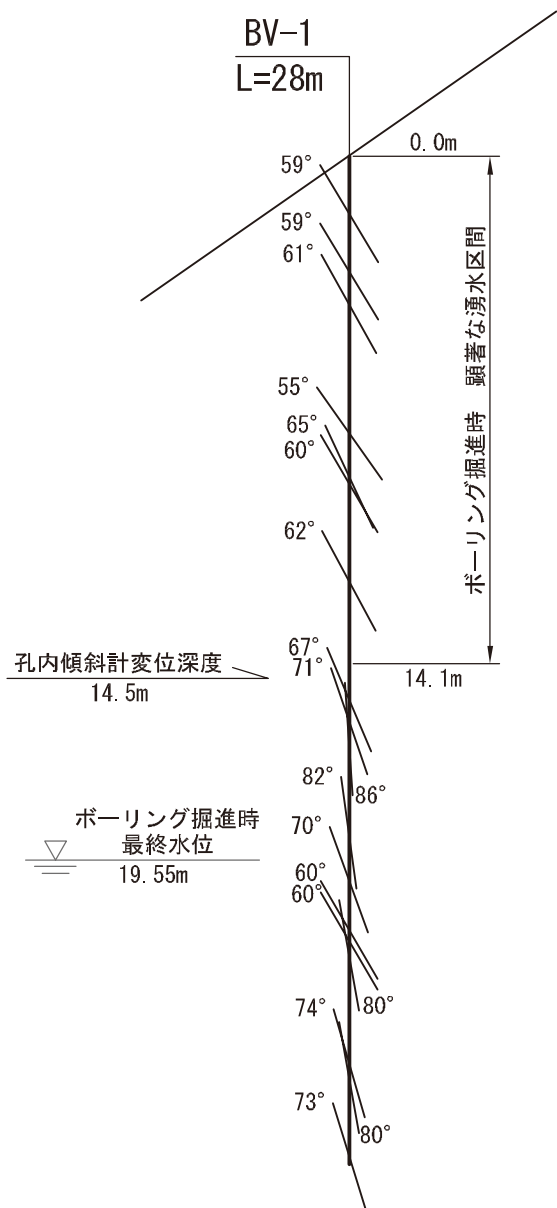


図-28 ボーリングコアの不連続面の傾斜の変化からトッピング深度を推定

Fig. 28 Toppling depth is presumed based on change of the inclination of the surface of discontinuity of drilling core.

(4) 孔内傾斜計観測による判定

トッピングが認められた斜面や法面ではボーリング調査孔を利用して孔内傾斜計観測を行えば、トッピングの基底深度を検出できることがある。

事例 15 ではトッピングの発生直後に抑え盛土が実施されて法面は目に見える変動がなくなったが、ボーリング調査孔に孔内傾斜計測定用のガイドパイプを設置し、1日に数回の頻度で傾斜計を挿入して観測を実施した。その結果、地すべり面に見られるようなせん断変形は検出されず、地表変位の 20 mm は深度 14.5 m からの明瞭な傾斜変動のみによることが示され、この深度をトッピングの基底と判断した。なお、後で述べるように斜面の場合でも孔内傾斜計観測によって微小なトッピング変位の把握ができた例があり、本計測手法がトッピング斜面の安定性や規模を把握する上で有効である。

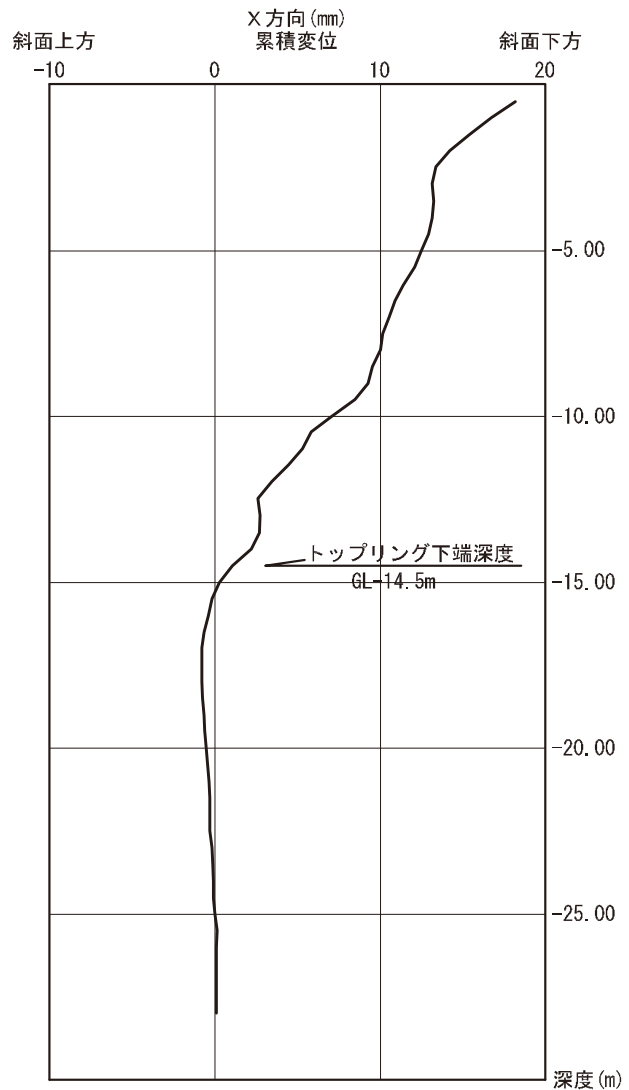


図-29 孔内傾斜計測定によるトッピング深度の確定

Fig. 29 Decision of the toppling depth by borehole inclinometer measurement.

4.3 トップリングの発生機構

事例(1, 3, 4, 5, 10, 11, 13, 15)は切土による初生的なトップリングの発生であり、応力開放や応力のバランスが崩れた影響と考えられる。事例(6, 7, 9, 12, 16, 17, 18)は斜面での長期クリープによるトップリングが既に進行した場所であり、事例(2, 8, 14)は切土と長期クリープの影響が複合したものと考えられる。これらの中では降雨時に変位の進行や崩壊に至ったものが多く、雨水浸透による間隙水圧の発生がトップリングによる斜面や法面の不安定化に大きな影響を与えている。

4.1で述べたトップリング発生斜面や法面の特徴について、素因と誘因の面から整理すると表-2のようになる。

表-2 トップリングの素因と誘因
Table 2 Some causes of toppling

素因	1) 層理面・片理面等の不連続面が発達し、斜面や法面との関係が高角度の受け盤である。 2) 斜面や切土の延長方向と不連続面の走向がほぼ平行(交角20~30°まで) 3) 尾根地形の斜面や切土法面(側面の拘束がなく開放された状態)
誘因	1) 切土や侵食に伴う応力開放と応力バランスの変化 2) 雨水の浸透による間隙水圧の発生

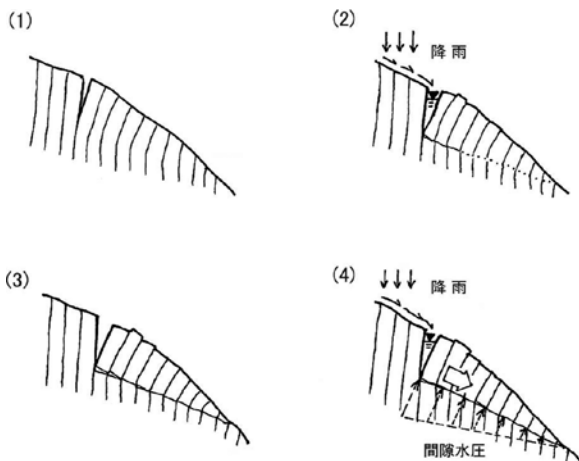


図-30 トップリング発生斜面の崩壊機構説明図
Fig. 30 Explanation chart of slope collapse mechanism.

素因と誘因を考慮してトップリングの発生から崩壊に至る過程は図-30の模式図³⁰⁾のとおりで以下のように説明できる。

- ① 切土や侵食で斜面・法面の応力開放や応力バランスが崩れて不連続面が開口する。
- ② クラックに雨水や地下水が流入して間隙水圧の作

- 用でトップリングが進行する。
- ③ 降雨の影響が繰り返されてトップリング基底面の破断が連続する。
- ④ トップリング基底面(破断面)全体に間隙水圧が繰り返し作用するようになり、不安定化が進んで崩壊が発生する。破断面はすべりにくいため、崩壊直前までせん断変位が表れにくく最終的に急速な崩壊になりやすい。

この模式図は切土による急速な応力開放を念頭において短期的なトップリングの発生過程を示したものであるが、自然界での斜面の形成は数万~数十万年といった時間スケールで行われる。その場合の斜面の不安定化は、繰り返して発生する地震や降雨によって長期的に進行し、極度に不安定化した斜面が最終的に地震や降雨の影響で崩壊するものと考えられる。すなわち、緩みの無い新鮮な岩盤で構成される斜面が地震や降雨で突然崩壊するのではなく、図-31に示すように斜面は長期にわたる地震や降雨等の影響により不安定化する準備段階を経て最後の一撃で崩壊に至るものと説明できる。したがって、トップリングを発生するような地形地質条件の斜面であればクリープ変位が進行する状況を検出できる可能性が高い。

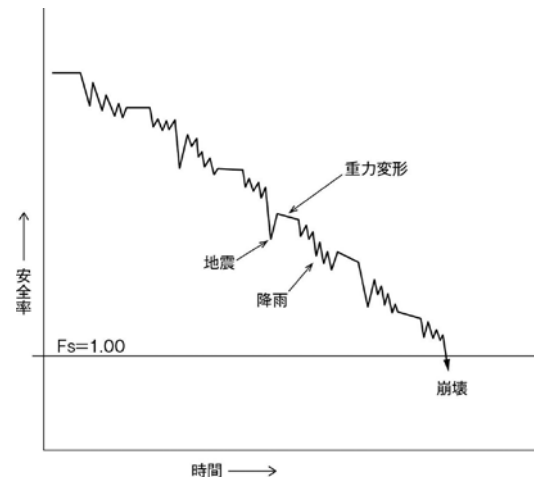


図-31 斜面が地震や降雨の影響で崩壊に至る模式図
Fig. 31 Outline diagram to which a slope collapses under the influence of earthquake and rain.

そこでトップリングの微小な変位を把握する目的で、不連続面(層理面)が急傾斜で受け盤構造をなし、尾根部に斜面の不安定化によって形成される線状凹地(二重山稜)が確認された山腹斜面で孔内傾斜計観測を行った。測定孔のボーリング調査では地質は硬質な砂岩であるが、開口割れ目や空洞が存在し掘進中は漏水が顕著で山腹のゆるみが認められた。観測結果は図-32に示す通りで、約2年間に地表が9mmほど転倒変位したことを示しており、直ちに危険な状況ではないがトップリングの基底深度は約20mに及ぶことを確認した。

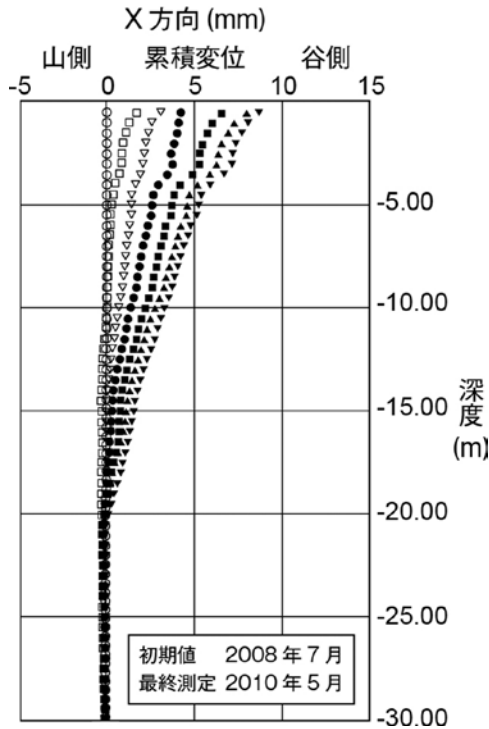


図-32 孔内傾斜計測定でとらえた斜面のトップリング変位
 Fig. 32 Toppling displacement of the slope caught by borehole inclinometer measurement.

トップリングタイプの大規模な岩盤クリープについて、目代³¹⁾は大井川上流の四万十帯分布域において長期的な変位速度を検討した。これによれば尾根部に数条の線状凹地が発達する赤崩や山伏での山体の重力変形が2万5千年前に始まったこと、大規模崩壊地のある赤崩周辺ではGPS観測等を含めて年間8mm程度の変位が万年オーダーで長期的に継続していると結論している。この値は図-32に示す例と同レベルの変位速度であり、尾根部に線状凹地の認められる斜面でのトップリングの変位速度として興味ある結果といえる。

4.4 安定検討

トップリングは、急傾斜受け盤構造の不連続面がせん断破壊して発生する。いいかえれば、トップリングは、「受け盤構造をなす不連続面のせん断抵抗力」が「斜面や法面の傾斜方向の応力によって不連続面に作用するせん断力」より小さい場合に発生することになる。この点を考慮した力学的モデルについて、Cruden²⁶⁾や目代ほか¹⁷⁾の検討を図-33に引用する。

この不連続面に作用するせん断力は斜面や法面に平行に作用する応力Pによるものとする。図を参考にして不連続面に作用するせん断力(T)と垂直力(N)は次のようになる。

$$T = P \times \sin(\beta - 90 + \alpha), \quad N = P \times \cos(\beta - 90 + \alpha)$$

ただし、不連続面の傾斜(α)、斜面や法面の傾

斜角(β)

不連続面のせん断強さは粘着力を無視して内部摩擦角(φ)のみとすると、安全率(Fs)は次式で示される。

$$Fs = N \times \tan\phi / T$$

$$Fs = P \times \cos(\beta - 90 + \alpha) \times \tan\phi / \{P \times \sin(\beta - 90 + \alpha)\}$$

・・・(1式)

したがって、

$$Fs = \tan\phi / \tan(\beta - 90 + \alpha) \dots (2式)$$

トップリングの力学的な発生条件は、上式の安全率がFs < 1.00、すなわち次の条件になる。

$$(\beta - 90 + \alpha) > \phi \dots (3式)$$

ところがこの結果を上手く適用できる場合と適用困難な場合のあることがわかった。この点について、例題をもとにして上手く検討できる場合(例題1)とそうでない場合(例題2)を示す。

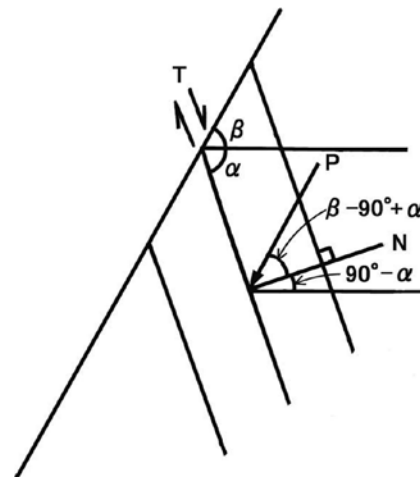


図-33 不連続面に作用するせん断力の説明図
 Fig. 33 The diagram of shear stress which acts on a surface of discontinuity

<例題による検討>

例題1: 不連続面の傾斜(α = 80°)、傾斜角(β = 45°)の法面でトップリング崩壊が発生した場合について検討する。

崩壊時の安全率をFs = 1.00として2式から不連続面のせん断強さφを逆算する。

$$Fs = \tan\phi / \tan(\beta - 90 + \alpha)$$

$$1.00 = \phi / (45 - 90 + 80) \quad \text{から} \quad \phi = 35^\circ$$

次に斜面の安全率をFs = 1.20とするための法面傾斜(β)を求める。

$$1.20 = \tan 35 / \tan(\beta - 90 + 80) \quad \text{となり、}$$

$$\tan(\beta - 10) = 0.583$$

よって β = 20° (勾配1:2.7)

この場合の結論として、傾斜45°(勾配1:1.0)の法面でトップリングが発生したが、計画安全率をFs = 1.20とするためには法面の傾斜を20°まで緩くすればよいとの解答が得られる。

例題2:不連続面の傾斜 ($\alpha = 60^\circ$), 傾斜角 ($\beta = 30^\circ$) の法面でトップリング崩壊が発生した場合について検討する。

崩壊時の安全率を $F_s = 1.00$ として次式から ϕ を逆算する。

$$F_s = \tan\phi / \tan(\beta - 90^\circ + \alpha)$$

$$1.00 = \phi / (30 - 90 + 60) \quad \text{から} \quad \phi = 0^\circ \text{となる。}$$

この結果は不連続面の強度がまったく無いことになり矛盾を生じる。

例題1のように検討可能な例は図-23のA線から遠い位置にプロットされる事例であり、この場合はトップリングを生じた斜面や法面において、トップリング発生のつりあい式を用いることで容易に計画安全率に応じた安定勾配を求めることができる。

ところが、例題2のような場合、図-23のA線に近い位置にプロットされる事例では不連続面の強度が0に近い状態になって矛盾を生じる。この理由は、作用する応力の方向が斜面や法面の傾斜に平行という前提条件があるためであり、実際には図-24(c)に示したように応力の作用方向が異なる場合があることに起因するものと考えられる。また、法面下部が図-34のように押し出してその上部が小規模にトップリングを生じた事例も図-23のA線上にプロットされる構造であり、法面の掘削では法面下部に脆弱部が出現する場合に注意すべきである。

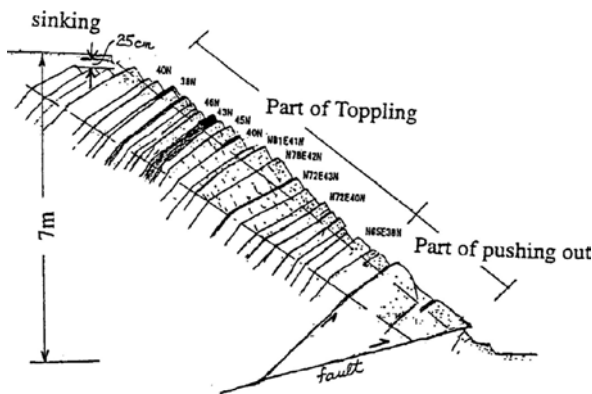


図-34 法面下部の変状で発生するトップリング
Fig. 34 Toppling occurs by displacement of the lower part of a slope

例題2の矛盾から引き出される考えとして、図-30(4)に示すようにトップリングが発生して時間が経過すると、トップリングの下端面がすべり面になって崩壊や地すべりへ移行することがあげられる。この点から、既に顕著なトップリングの認められる斜面や法面の安定解析に際しては、通常用いられる地すべりと同様の極限平衡法による安定計算の適用が妥当と考える。

4.5 対策

(1) 事前対策

切土計画では基本として、図-23を参考にして横断面における層理面等の不連続面の構造が図のA線以上の領域になる場合は、A線以下の領域になるように法面の傾斜を緩くするべきである。しかし、不連続面が高角度の場合には機械的な適用は難しくなる。例えば不連続面の傾斜が80°の場合、同図から求まる安定法面傾斜は10°未満になるため、現実的な対応が困難である。

このため、不連続面のせん断強さ (ϕ) について設計採用値を決めて、どの程度まで法面傾斜を急にして(A線を越えて)所要の安全率が確保できるか2式によって検討する方向が現実的である。この場合は、事例2,3のように法面下部に部分破壊するような弱部がないか確認する必要がある。あるいは施工時の注意事項として法面下部に破碎帯等の弱部が出現した場合の強化処置を見込んでおくことが望ましい。

以上の検討において安全率が不足する場合には不連続面を補強する対策が必要になる。その際には事前にトップリング発生深度を予測し、深度が浅ければロックボルト、深い場合にはグラウンドアンカーによる対策が必要になる。トップリング発生深度の予測は困難であるが4.2で説明した中での形状比からの経験的な想定(法面幅や尾根幅から深度を想定)に加えて、ボーリング調査等を参考に想定する。トップリング対策のためのロックボルトやグラウンドアンカーの設計法がないことが問題であるが、現状では通常用いられるすべり面を想定した設計法を援用して対応することになる。なお、グラウンドアンカー等の配置は地すべり対策のように法面下段に集中すると上段でのトップリングが防止できないことがあるため、トップリングの恐れのある法面に均等配置することが望ましい。

(2) 変状発生後の対策

トップリング発生後の斜面や法面の安定対策としては、変状した部分の排土が基本であり、大半は尾根地帯であるため法面傾斜を緩くして対処することができる。法面の傾斜については、4.4安定検討の例題1に示した計算方法が適用可能であれば、この方法によって安全率との関係から求める。用地の制限等があつて変状部を残す場合には、その部分に浸透地下水を貯留しやすくなって不安定になるため、排水ボーリング等による地下水排除工は必須の対策になる。

また、排土工による法面の安定勾配が確保できない場合は、ロックボルトやグラウンドアンカーによる抑止対策になるが、この場合も地下水排除対策は必須になる。グラウンドアンカー等の設計法は事前対策で説明したとおりである。

5. まとめ

- 1) トップリングは、層理面や片理面等の不連続面が発達する地質に発生しやすく、マサ状風化した地質でも粘土シームの挟在などの条件があれば発生する。
- 2) トップリング発生の素因として、地質的には斜面や法面に対して不連続面が急な角度の受け盤構造であり、地形的には側面の拘束がなく開放された尾根状地形があげられる。また、誘因として、切土や侵食に伴う応力開放や応力バランスの変化、および雨水の浸透による間隙水圧の発生がある。
- 3) トップリング発生の基底深度を求めるには次の方法がある。
 - ① 地すべりの横断形状比の適用によるトップリング変状幅からの想定
 - ② 不連続面の傾斜変化と地表の変位量から求める方法
 - ③ ボーリング調査時の透水性の変化や、採取コアの不連続面の傾斜の変化から求める方法
 - ④ 孔内傾斜計の観測による方法
- 4) トップリング発生の Cruden の力学モデル²⁶⁾をもとにした安全性の検討方法と適用に限界があることを示した。
- 5) トップリング対策としては、斜面や法面と不連続面との関係について図-23を参考に安定性が高くなるように、斜面や法面の傾斜を緩くすることが基本になる。トップリングで変動した部分を斜面や法面に残す場合は、地下水排除工が必須である。また、グラウンドアンカー等の抑止対策を行う場合は、地すべり対策とは異なり均等な配置にすべきである。

参 考 文 献

- 1) 長谷川啓明・木内 彰(1977):道路災害における崩壊予測について(多摩湖畔道路災害), 土と基礎, 第25巻, 第3号, 83-86.
- 2) 岩松 暉・下川悦郎(1986):片状岩のクリープ性大規模崩壊, 地質学論集, 第28号, 67-76.
- 3) 渡辺正幸・中村良光・笹原克夫(1992):国道158号猿なぎ洞門の岩盤崩壊について, 土木技術資料, 第34巻, 第5号, 68-73.
- 4) 上野将司(2006):受け盤斜面の安定性に関する検討・地盤災害・地盤環境問題論文集, 第6巻, 愛媛大学・地盤工学会四国支部, 91-96.
- 5) 上野将司(2009):トップリング発生斜面の特徴, 日本地質学会第116年学術大会(岡山)
- 6) Goodman R. E. and Bray J. W.(1976): Toppling of rock slopes, Proc. Speciality Conference on Rock Engineering for Foundation and Slopes. Boulder, Colorado, ASCE, Vol. 2, 201-234.
- 7) 千木良雅弘(1983):節理性岩盤表面部にみられるトップリングの性質とその意義, 応用地質, vol. 24, No. 1, 9-20.
- 8) 横山俊治・柏木健司(1996):安部川支流関の沢流域の瀬戸川層群に発達する斜面の傾動構造の運動像, 応用地質, 第37巻, 第2号, 20-32
- 9) De Freitas M. S., Watters R. J.(1973): Some field examples of toppling failure, Geotechnique, Vol. 23, No. 4, 495-513.
- 10) 門間敬一・小野田敏・落合達也・荒井健一・綱木亮介・浅井健一(2002):岩盤崩壊モニタリング箇所での転倒崩壊に至るまでの変位挙動の計測例, 地すべり, 第39巻, 第1号, 62-69.
- 11) 新津 誠(1986):斜面の転倒崩壊, 地質学論集, 第28号, 77-86.
- 12) L. Muller(1964): The rock slide in the Vajont valley, Rock Mechanics and Engineering Geology, Journal of the International Society of Rock Mechanics, Vol. II/3-4, 148-212.
- 13) 久保匡義・今井恵史・玉澤 隆・木暮 崇・須藤宏・上野将司(2010):足尾帯における切土のり面のトップリング現象と地質構造の関係, 日本応用地質学会研究発表会講演論文集, 95-96.
- 14) 上野将司(2004):切土のり面の設計・施工のポイント, 理工図書, 1-14.
- 15) 上川裕之・山本定雄・市原 健・上野将司(2002):和泉層群の受け盤切土のり面で発生した変状事例, 第41回日本地すべり学会研究発表会講演集, 285-288.
- 16) 細木康夫(2002):和泉層群地盤の切土工事における法面崩壊事例, 地盤災害・地盤環境問題論文集第2巻, 愛媛大学・地盤工学会四国支部, 73-86.
- 17) 目代邦康・千木良雅弘・長谷川修一(2001):急傾斜する頁岩砂岩互層のトップリングにより出現した斜面変形—小規模な山向き小崖とその内部地質構造—, 地形, 第22巻第5号, 837-856.
- 18) 山原茂雄・高柳朝一(2003):トップリング崩壊の変状と機構の考察, 地盤災害・地盤環境問題論文集, 第3巻, 愛媛大学・地盤工学会四国支部, 4-12.
- 19) 高柳朝一・永野 潤・池田小織・菊池利夫(2002):大規模掘削に伴うトップリング事例, 地盤災害・地盤環境問題論文集, 第2巻, 愛媛大学・地盤工学会四国支部, 17-24.
- 20) 山本哲郎・高本直邦・西村祐二郎・瀬原洋一(1996):三郡変成帯における鋸状斜面崩壊, 土と基礎, 第44巻, 第11号, 9-12.
- 21) 田近 淳・大津 直・雨宮和夫・和田 茂(2001):重力性曲げ褶曲による硬質頁岩層の斜面変動—北海道知内町尾刺建川線の例—, 地すべり, 第37巻, 第4号, 41-48.
- 22) 山田正雄・鶴飼恵三・橋本 純・河原裕徳(2008):地盤内線亀裂を考慮した3次元 FEM 浸透流解

- 析一塩の山地すべり地区を例として一，地すべり学会誌，第45巻，第3号，10-20.
- 23) 奥園誠之・羽根田汎美・安川正春(1982)：新しい断層面を持つ切土工事例とその対策，土と基礎，第30巻，第3号，33-38.
 - 24) 西川 徹・上野将司(2007)：切土のり面で発生したトッピングに対する検討例，日本応用地質学会平成19年度研究発表会講演論文集，27-28.
 - 25) 岩松 暉(1988)：九州における地すべり災害，土と基礎，第36巻，第3号，93-96.
 - 26) D. M. Cruden(1989)：Limits to common toppling, Can. Geotech. J. 26, 737-742.
 - 27) 鈴木隆介(2000)：建設技術者のための地形図読図入門(第3巻) 段丘・丘陵・山地，古今書院，762-763.
 - 28) 上野将司(2007)：斜面のトッピング発生深度の推定法について，日本地球惑星合同大会2007年大会予稿集.
 - 29) 上野将司(2001)：地すべりの形状と規模を規制する地形・地質要因の検討，地すべり，第38巻，第2号，1-10.
 - 30) Ueno Shoji(2001)：A study on the collapse mechanism of reverse dip slopes, IS on Geotechnical & Environmental Challenges in Mountainous Terrain, Nepal Engineering College, 360-365.
 - 31) 目代邦康(2002)：トッピングタイプの岩盤クリーブによる山体重力変形の地形学的研究，京都大学博士論文.
 - 32) 上野将司・市原 健・森川倫人・山本定雄(2001)：受け盤斜面における崩壊機構の検討，日本応用地質学会中国四国支部平成13年度研究発表会論文集，97-102.