

斜面防災について（岩盤斜面を中心として）

桑原啓三*

1. はじめに

ニュートンはリンゴが落ちるのを見て万有引力を発見した。高い所にあるものは、時間軸を問わない限り、位置エネルギーを下げるように必ず低い所に移動し、より安定化する方向に向かう。一見極めて堅硬で安定しているように見える岩盤斜面も同様である。長期間の風化進行によって安定を損ない、変形や破壊を生じて移動する、すなわちマスムーブメントを生じる。岩盤斜面の変形・崩壊のうち、落石、崩壊、トップリング等の運動は破壊を主とし、突発的で極めて急速である。一方、サッキング（クリープ）、重力滑動等の主として変形を主体とした動きの極めて遅いものがある。土砂地盤のようなある程度の前駆現象があり、動きもそれほど早くないようなものは地すべりを除けば少ない。岩塊の移動が極めて急速であるか、あるいは計測に耐えないほど緩慢なものであるか両極端であるために、岩盤の変形と崩壊（マスムーブメント）についての研究は、多くの人が問題視している割には余りなされていないのが実状である。

本文では、この様な点を踏まえて岩盤斜面の変形・崩壊（マスムーブメント）の形態にはどのようなものがあるかを中心に述べ、また割れ目崩壊の解析法について紹介するものである。

2. 岩盤斜面の変形・崩壊形態

岩盤斜面がより安定化しようとするとき、岩盤斜面の変形・崩壊（マスムーブメント）の形態には図-1に示すように、落石、崩落、トップリング、平面崩壊、くさび崩壊、円形崩壊、地すべり、サッキング（クリープ）、重力滑動（ナップ）等がある。

2.1 落石

落石は、日本道路協会「落石対策便覧」によると、岩盤の割れ目が拡大し、岩塊や礫が剥離したり、表層堆積物、火山噴出物、固結度の悪い砂礫層の中の岩塊、玉石、礫が表面に浮きだして斜面より落下する現象をいう、としており、さらに落石は個数で表現できる程度の少量のものを言うとして崩壊と区別している。同様に、岩盤の滑落（崩落）との境界は明瞭ではなく、個数表現のできるものが落石で、体積表現するものが滑落と呼ぶべきものであろう。

2.2 滑落（崩落）

滑落は落石の大きなもので、すべり面がなく、岩塊がマスとして急激な速度で潜在節理、層理、片理等から剥離、落下するものである。力学的には落石と同じ現象であるが、規模が $10^2 \sim 10^3 \text{ m}^3$ オーダーと大きく、岩種的には柱状節理の発達する熔岩、熔結凝灰岩、凝灰角礫岩、硬質砂岩、花崗岩等の岩盤に顕著にみられる。前駆現象は全く無いかあるいはあっても本崩壊のかなり前であることが多く、前駆現象として捉えられない。1987年北海道層雲峡で発生した岩石滑落がこれに類し、図

* 国土開発技術研究センター 技術参与

運動の形態

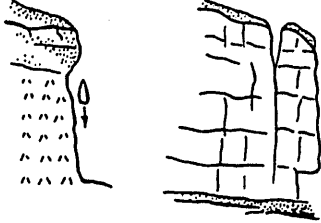

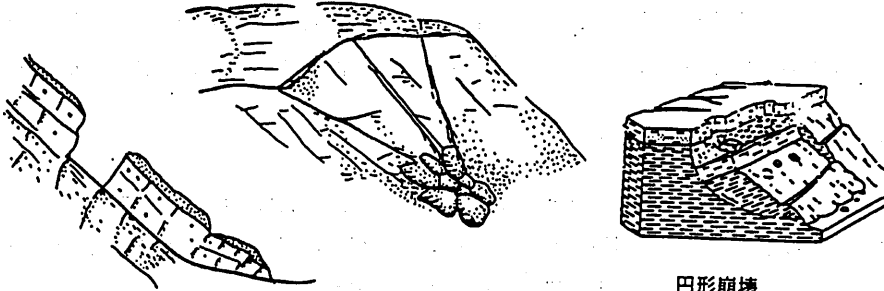
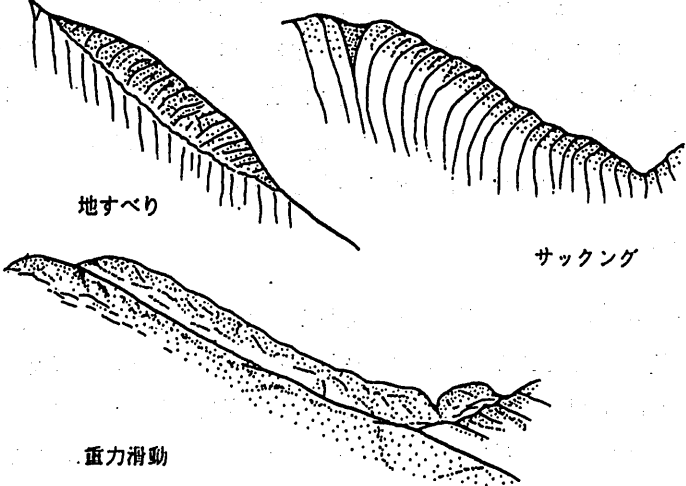
<p>崩落</p>	 <p>落石 滑落</p>
<p>トップリング</p>	
<p>すべり</p>	 <p>平面崩壊 くさび崩壊 円形崩壊</p>
<p>流動</p>	 <p>地すべり サッキング 重力滑動</p>

図-1 岩盤斜面移動形態の類型

- 2 に示すように、層雲峡熔結凝灰岩が幅20m、奥行き 5 m にわたって柱状節理にそって剝離、落下した。

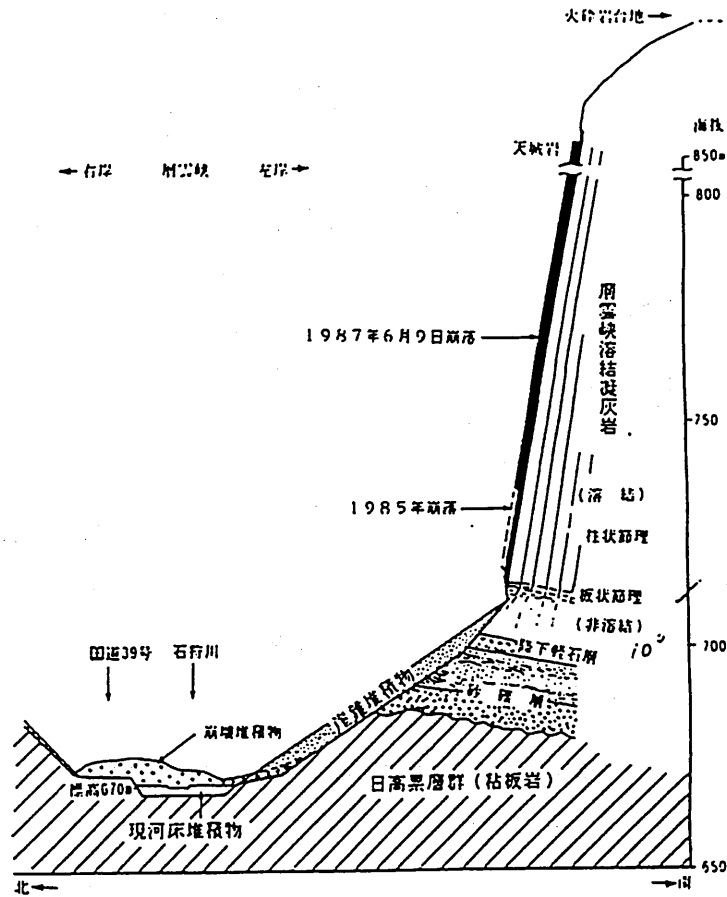


図-2 層雲峡の地質断面図

2.3 トッピング

岩盤斜面において急傾斜受け盤をなす岩塊または岩柱が重力の作用で頭の部分が倒れるように回転しながら破壊するもので、一般に小規模であるが、戸板山の崩壊のように大規模なものも存在する。トッピングは柱状節理の発達する熔岩、熔結凝灰岩等に多く見られるが、関東ロームの直立崖等でも乾燥亀裂によって生じることがあり、その破壊形式にはたわみ性トッピング、ブロックトッピング、2次的な作用でできるトッピング(図-3)がある。

後述するクリープ変形によるものもトッピングと呼ばれることがあるが、トッピングがクリープに比べ運動速度が早いこと、トッピングは回転中心に回転角が変わらないのに対し、クリープは回転角が変わることなど運動様式が異なることから両者は区別される。

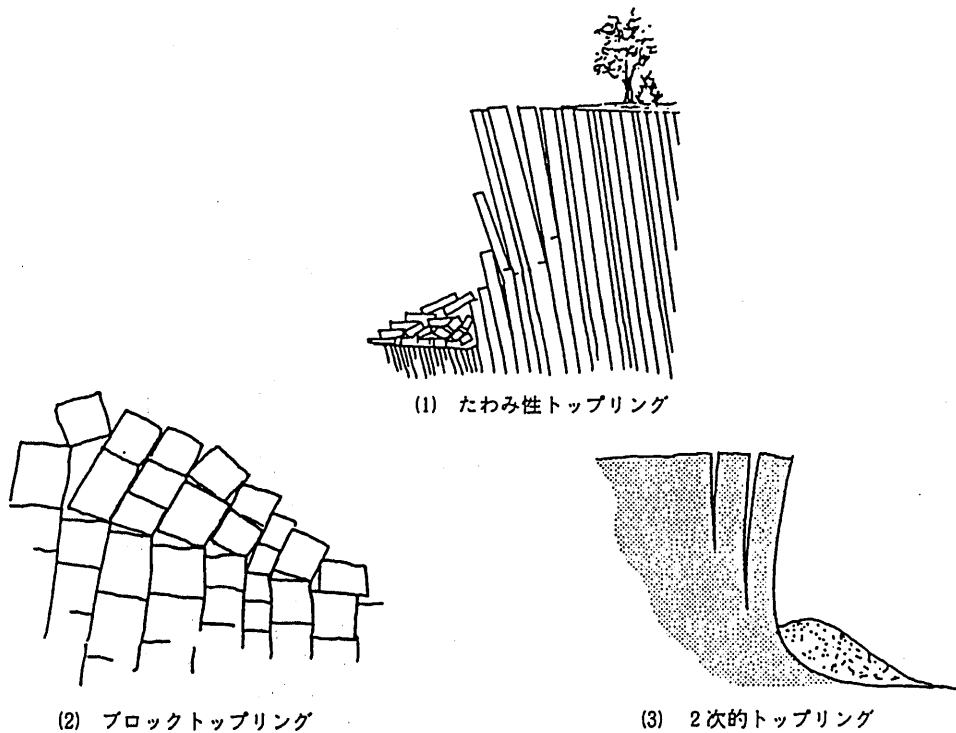


図-3 トッピング

2.4 平面崩壊（平面すべり）

平面崩壊(図-4)は、層理面、節理面等の不連続面が斜面に平行かそれに近く斜面より緩く（流れ盤）かつ内部摩擦角より大きいときに生じる。岩盤崩壊ではこのタイプと次のくさび崩壊タイプが最も多い。この崩壊は、すべりに対して無視できる程度の抵抗しか持たない解放面がすべり岩塊の両側に存在する必要があり、実際には図-7に示すような1面または2面が遊離面となる場合に生じる。

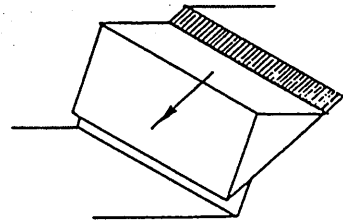


図-4 平面崩壊

2.5 くさび崩壊（交線すべり）

くさび崩壊(図-5)は、岩盤が3方向の割れ目系または不連続面で構成されているとき、その内2面をすべり面、他の1面が遊離面となる場合である。一般にはこれらの分離面が、図-5のように、斜面の肩を横切り、分離面の交線にそってすべるものが多い。崩壊規模は $10^2 \sim 10^3$ m²オーダーであるが、 10^2 m²オーダーのものが多い。平面崩壊も同規模である。

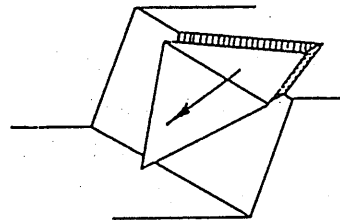


図-5 くさび崩壊

2. 6 円形崩壊 (スランプ)

土砂斜面における円弧すべりと同様の崩壊で、岩盤の場合は岩盤中の割れ目の発達ที่著しいとき、風化して岩盤の強度が著しくて易化したとき等斜面を構成している岩盤が均質であるときに主に生じる。また硬岩よりなる岩盤で浸食量の大きい谷では新鮮な岩盤中にオープンクラックを形成して円形崩壊 (岩盤地すべり) を生じることがある。

2. 7 地すべり

円形崩壊とはほぼ同様な形態をとるが、崩壊土塊の形成は次に述べるサッキング (クリープ変形)、重力滑動に伴う表層の緩みによって生じ、緩み土塊の一部がすべり面を形成して崩壊するものである。南アルプスの地すべりあるいは大崩壊と呼ばれているものは大部分がこれに類すると思われる。

2. 8 サッキング (クリープ)

サッキング Suckung (クリープ) はいわゆる 10^7 m²以上の巨大崩壊に属するもので、巨大崩壊の中には1888年磐梯山の水蒸気爆発に伴う大崩壊 (1.210×10^6 m²)、1978年伊豆大島近海地震による稲取付近の土塊の移動 (幅2 × 奥行5 km)、1984年長野県西部地震による御獄山の大崩壊 (34×10^6 m²)、1586年天正地震による帰雲山の大崩壊 (2.5×10^6 m²)、1500年頃から崩壊を始めた大谷崩れ (1.200×10^6 m²)、七面山の大崩壊等様々の形態のものがある。巨大崩壊の地質的特色としては第四紀火山岩の比高の大きい急崖に多いこと、火山岩を頂部に乗せる第三紀層に多いこと、四万十帯のように第四紀起伏量の大きい山地に多いこと、第四紀断層等活構造に関連したものが多いこと等が上げられる。

この内、二重山稜 (図-6) と呼ばれる山頂部に地割れ地形を形成するような変形あるいは変形に伴うような大崩壊をサッキングと呼ぶことにする。

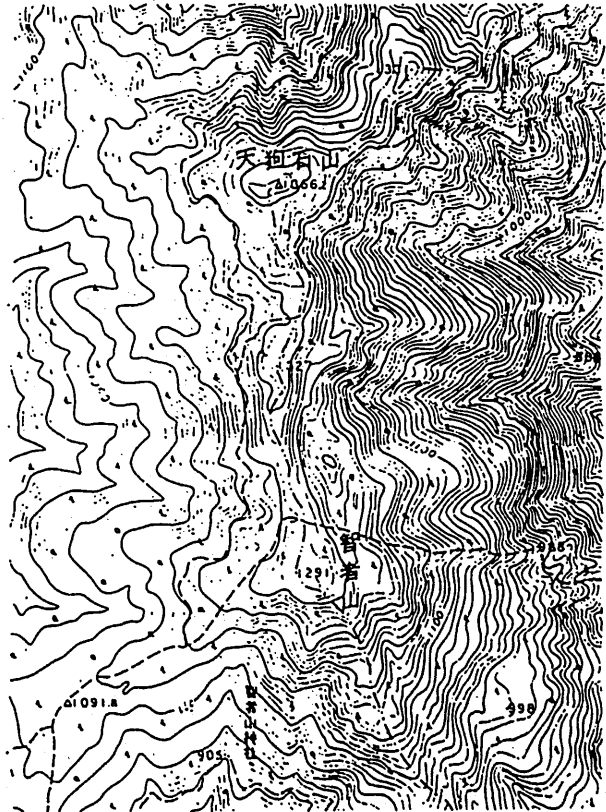


図-6 二重山稜

智者山の字の所は谷部で、その両側は尾根になっている。図中央に陥没地形がある。

gravitational gliding あるいは gravitational spreading もこれに含まれることもあるが、これは次に述べる重力滑動に含まれ、一般には明瞭なすべり面を形成しないクリープ変形によって生じたものを言う。また 2.7 で述べた地すべりはこの変形に伴う小規模（全体の変形に対して）な表層近くで生じているものである。その意味では七面山の崩壊等はここで言うサッキングのごく一部の現象が生じているものに過ぎない。

2.9 重力滑動

緩い傾斜を持ったすべり面(デコルマ)にそって岩体が移動するナップの一部は重力の影響によって滑動する gravitational gliding あるいは gravitational spreading により形成され、移動速度は極めて遅く、幅は数100mから100kmを越すものまで存在する。デコルマ面の上位の岩塊は著しく褶曲していることがある。

この他、重力による大規模な移動形態としては、ブロック移動、上部岩塊の重量による下部層の“絞り出し”等の現象があるが、ここでは述べない。

3. 変形・崩壊の発生機構

2で述べた岩盤の崩壊・変形は概ね2つのグループに分けられる。1つは落石、滑落、トップリング、崩壊等の破壊グループであり、もう1つはサッキング、重力滑動等の変形グループである。

3.1 破壊グループ

六面体を形成するような3方向の割れ目系を有する岩盤の斜面は、割れ目系で作られる3つの面によって構成される。3つの面は節理、層理、片理、断層等の地質学的不連続面であり、その強度は岩石自体の強度に比べ著しく小さく、その面は平滑で、注目する岩塊中で完全な広がりを持ち、岩石自体の変形および破壊がない（剛体）とすると、図-7に示すようなすべりのタイプが考えられる。図-7において、 Z_0 は安定な状態であり、 Z_1 、 Z_2 、 Z_3 は2面すべりすなわちくさび崩壊を、 Z_{11} 、 Z_{12} 、 Z_{21} は一面すべりすなわち平面崩壊を示している。そして Z_{11} は面を利用しない落石あるいは滑落を表している。すなわち、落石、滑落は割れ目（潜在割れ目）の付着力のみで安定を保っており、風化の進行に伴い、付着力が減少し、岩石の重量バランスが崩れた場合崩落する。

一方、平面崩壊、くさび崩壊は不連続面の摩擦力によって安定を保っており、不連続面の内部摩擦角 ϕ と滑動力によって安全率が求まる。すなわち、図-8においてすべり岩塊の重量ベクトル W が底面幅の中にあるときすべりを生じることになり、そのときの岩塊の安全率は、

$$F_s = \frac{CA + W \cos \phi \cdot \tan \phi}{W \sin \phi} = \frac{\tan \phi}{\tan \phi}$$

で求めることができる。

タイプ	Z ₀	Z _i	Z _k	Z _j	Z _{ik}	Z _{jk}	Z _{ij}	Z _{ijk}	
モード図									
接触面	安定 i, j, k	交線滑り j, k	交線滑り i, j	交線滑り i, k	平面滑り j	平面滑り i	平面滑り k	浮上り 無し	
開放面	-	i	k	j	ik	jk	ij	ijk	

図-7 破壊グループのすべりタイプ

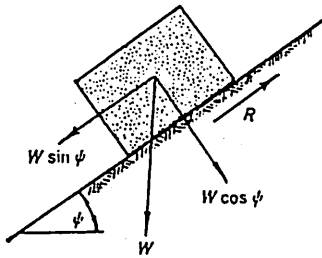


図-8 平面すべりモデル

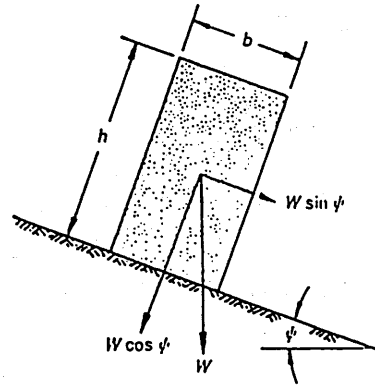


図-9 斜面上のブロック

岩柱が転倒するトップリングは、図-9に示すように、ブロックが高くて細い場合、岩柱の重力ベクトルWが底面bの外側に出る場合に生じる。このときの安全率は、

$$F_s = \frac{\frac{b}{2} W \cdot \cos \phi}{\frac{h}{2} W \cdot \sin \phi} = \frac{b}{h} \cot \phi$$

で表される。

このトップリングの発生する条件は、図-10に示すように、斜面の傾斜角 ϕ 、ブロックの内部摩擦角 ϕ およびブロックの高さhと幅bとの関係によって一義的に決まる。すなわち、

- ① $\phi < \phi$ および $b/h > \tan \phi$: 安定領域
- ② $\phi > \phi$ および $b/h > \tan \phi$: すべり領域

- ③ $\psi < \phi$ および $b/h < \tan \phi$: トッピング領域
- ④ $\psi > \phi$ および $b/h < \tan \phi$: すべりとトッピングがともに発生する領域
(実際にはトッピングが生じる)

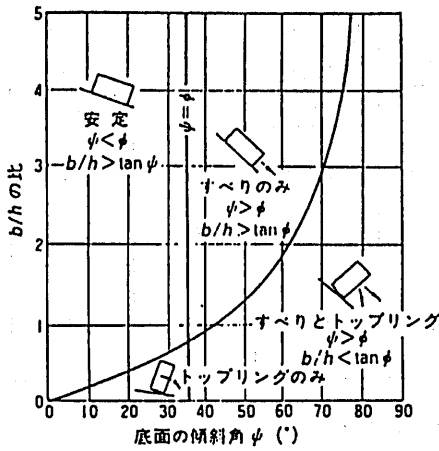


図-10 斜面上のブロックのすべりとトッピングの条件

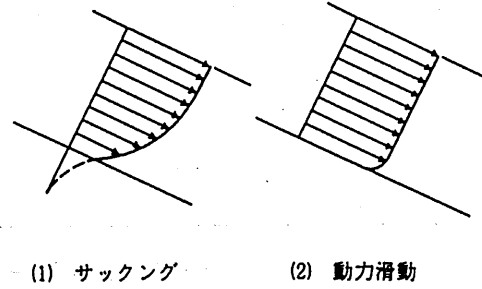


図-11 移動速度の分布

3.2 変形グループ

落石、トッピング、崩壊が不連続面の幾何学的な関係と強度に依存しているのに対し、ここで言う地すべり、サッキング、重力滑動は、地層岩体の重力による変形とそれに続く崩壊、すなわち粘弾性モデルで表れるような変形・崩壊過程を示す。地すべりは明瞭なすべり面を持ち、すべり面より上の土塊がほぼ一体となって移動する。サッキングは明瞭なすべり面を有せず(図-11(1))、移動速度が極めて遅く、サッキングの最終過程ではすべり面を形成し、移動速度は速くなり、劇的な移動速度を示す(Vajont valleyの崩壊)こともある。

重力滑動はデコルマ(大すべり面)を境界に図-11(2)に示すような移動速度分布を取るが、その移動速度はサッキングと同様極めて遅い。

4. 岩石斜面安定解析法

落石、平面崩壊、くさび崩壊等に安定を検討するためには一般に三次元問題を二次元問題として解析するウルフのネットを用いたステレオ解析が行われる。

4.1 ステレオ投影法

ウルフのネットは次のようにして投影される。すなわち、ある単位球を考え、三次元的平面はこの球の中心を通るとし、その平面と球の下半球との交線を上半球の極より赤道面上に投影する(図-12)。その赤道面上の投影線は大円を描く。面をウルフネット上で点として表すには、球の中心で面の垂線と下半球との交点を上半球の極より赤道面上に投影する。すなわち、ウルフネット上で

は常に大円と面の極との角度は 90° を保つ位置にある。一方、ある平面の垂線より角度 α の円錐の投影は、ウルフのネット上で面の極より角度 α を持つ小円で示される。小円は球の中心を通らない面と球との交線を赤道面上に投影したものである。

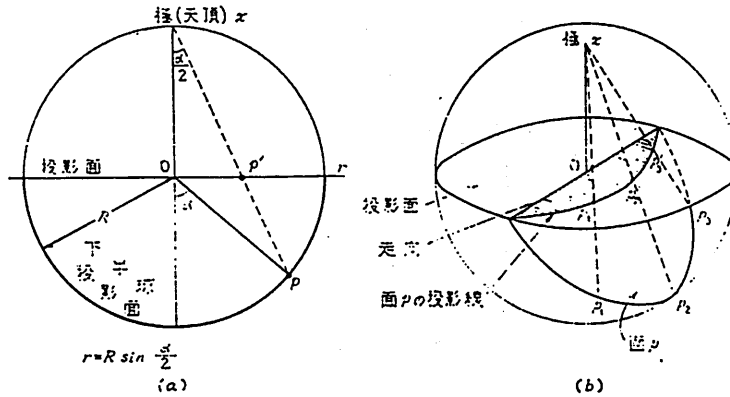


図-12 ウルフの投影法

4.2 ステレオネットによる解析

図-7で示したブロックの安定解析について最も簡単な平面崩壊を用いて述べる。斜面が節理、層理等の平面ですべる場合、平面の傾斜は斜面の傾斜より緩い必要がある。ステレオネット上では、図-13に示すように、平面を表す大円は斜面を表す大円の外側になければならない。換言すれば、図-14に示すように、斜面の極は平面の描く大円の基円との交点 p_1 と p_1' と、平面の極 P_1 を結ぶ大円 $p_1 P_1 p_1'$ の外側になければならない。

この場合でも平面には摩擦が作用しているため、必ずしも不安定といえず、すべるためにはすべりブロックはすべり面の摩擦角（粘着力相当のものは無視する）を越える作用力を持つ必要がある。これはステレオネット上ですべろうとする作用力は平面の極を中心として描かれる摩擦小円（半径 ϕ …すべり面の摩擦角）の外側にある必要がある。すなわち、ブロックの作用力 W は、ブロックの重力のみであるとすると、基円の中心に表示され、図-14の場合すべり面の極を中心として描かれる摩擦小円の外側に存在するので不安定である。

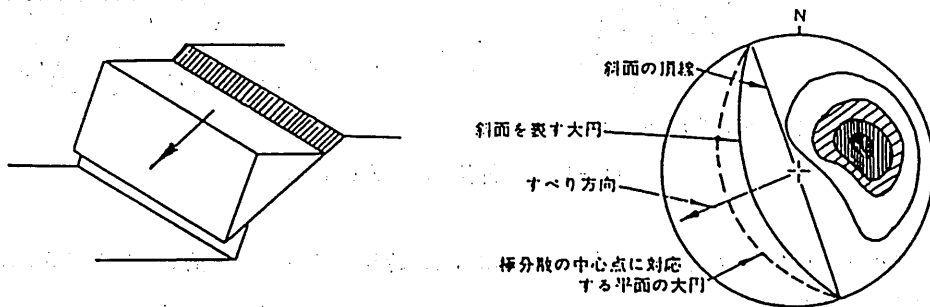


図-13 平面崩壊のステレオ表示

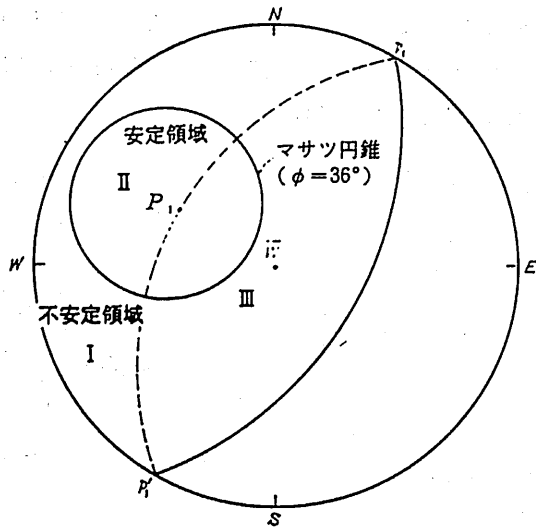


図-14 平面崩壊のステレオ表示 (極表示)

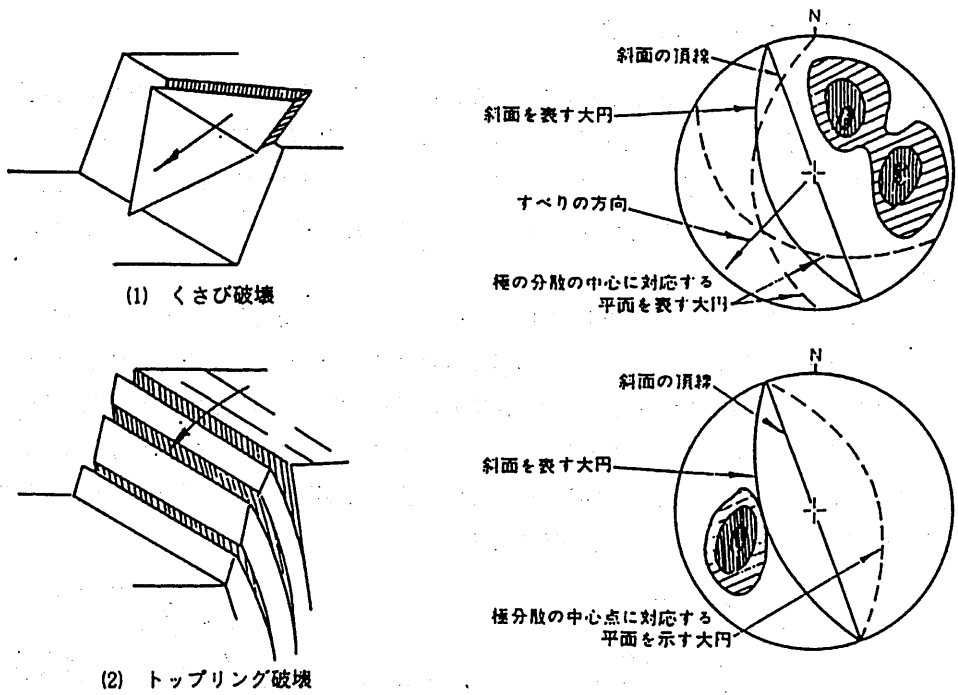


図-15 斜面崩壊とステレオ表示

すなわち、I 不安定な領域、II 十分な摩擦があれば安定な領域、III 摩擦なしでも安定な領域に区別することができる。

同様に、くさび崩壊の場合は、図-13に対応した図で示すと、図-15(1)に、トップリングの場合

は(2)に示すように表示される。

図-7に示した3面が遊離面となる場合、すなわちトンネルでの落盤、斜面での落石・滑落（厳密にいうとオーバーハング部での）は、図-16に示すように、基円の中心すなわち重力の方向が割れ目系 i, j, k を表す大円に囲まれた領域に含まれるので、発生する危険がある。（天井、オーバーハングの場合は斜面の場合と逆向き、すなわち大円の内側が危険側となる。天井の場合は基円が天井面を表し、その外側が被り側、基円の内側が自由空間を表す。）

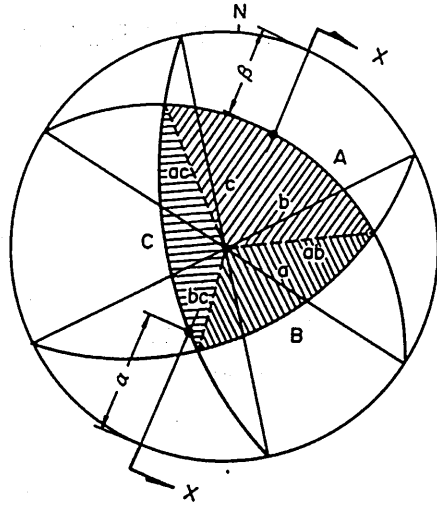


図-16 落盤のステレオ表示

4.3 安全率の求め方

すべりブロックの安全率は、粘着力、間隙水圧等がない場合、すべり面の摩擦角 ϕ 、すべりブロックの作用力の方向（重力の方向）とすべり面との法線との交角を ψ とすると、

$$F_s = \tan \phi / \tan \psi$$

で表され、 ψ と ϕ はステレオ投影で簡単に求められる。

粘着力、間隙水圧等が加わると次のようになる。すなわちブロックが図-17に示すように j 面上ですべると判定された場合、 R をブロックの頂点に平行移動する。 R を j 面に正射影したベクトル A がブロックの滑動する方向と大きさを表している。したがって、平面崩壊における安全率は次式で求めることができる。

$$F_s = \frac{(\bar{R} \cdot \bar{n}_j) \tan \phi_j + S_j C_j}{|\bar{A}|}$$

ここで、

$$|\bar{A}| = (\bar{A} \cdot \bar{A})^{\frac{1}{2}} = \{R \cdot R - (R \cdot \bar{n}_j)^2\}^{\frac{1}{2}}$$

ϕ_j : j 面のマサツ角

C_j : j 面の粘着力

\bar{n}_j : j 面からブロックの外側に向う単位ベクトル

S_j : j 面の面積

図-18で示されるようなくさび崩壊の場合も、同様に次のように求められる。

$$F_s = \frac{a_i \tan \phi_i + a_j \tan \phi_j + S_i C_i + S_j C_j}{a_{ij}}$$

ここに,

a_{ij} : すべりブロックのすべり方向 I_{ij} 方向の方向成分

a_i : すべりブロックの n_i 方向成分

a_j : すべりブロックの n_j 方向成分

S_i : n_i 面の面積

S_j : n_j 面の面積

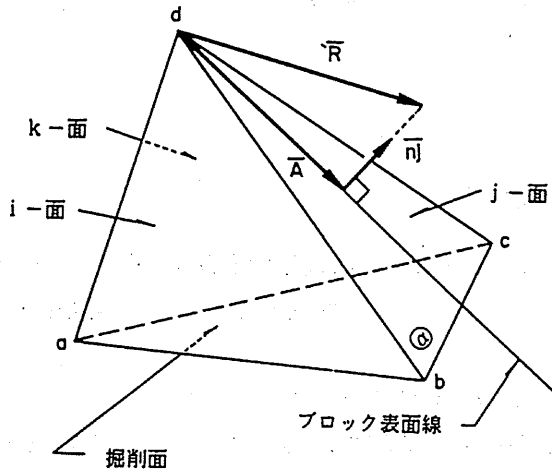


図-17 平面崩壊

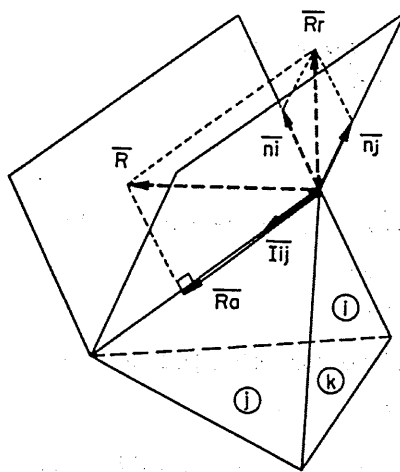


図-18 くさび崩壊

5. おわりに

今まで述べてきたように、岩盤の崩壊は岩盤の節理系を極めて単純にモデル化し、極めて単純な力学要素によって解析することができる。しかし、岩盤の変形・崩壊は本来安定した岩盤が長い年月の間の風化の進行によって、岩盤中の潜在クラックの顕在化、岩石自体の強度低下、水の浸透量の増加等を生じて、不安定化し発生するものである。したがって、岩盤の変形・崩壊は不明なことが多く、これを解明していくためには多くの課題が残されている。岩盤に関する課題だけでも、例えば、

- ①岩盤の風化の進行とそれに伴う物性の変化
- ②岩盤中の割れ目の発達状況
- ③割れ目性状の長期経時変化
- ④割れ目の表面形状による力学特性の変化
- ⑤岩盤中の割れ目系への水の浸透
- ⑥応力解放による岩盤性状変化

の様なものがあり、どれ一つ取ってもこれらは一朝一夕では解決できない。さらに今後より一層多方面からの研究が推進されることを期待するものである。

参考文献

- 東北地方建設局：地形による山地地盤調査法，昭和54年3月
土質工学会：キープロック受託研究委員会報告書，平成元年3月
小野寺・吉中訳：フックブレイ岩盤斜面工学，朝倉書店
赤井・川本・大西訳：グッドマン不連続性岩盤の地質工学，森北出版
山田・渡・小橋：地すべり・斜面崩壊の実態と対策，山海堂
木村敏雄：地質構造の科学，朝倉書店
大西・谷本訳：グッドマンわかり易い岩盤力学，鹿島出版会
応用地学研究会：応用地質学，国際科学振興財団
P. LONDE, G. VIGIER and R. VORMERINGER: Stability of Rock Slopes. A Three Dimensional Study. A.S.C.E., J.S.M.F.Div., pp235-262, 1969
K.W.John: Graphical Stability Analysis of Slopes in Jointed Rock. A.S.C.E., J.S.M.F. Div., pp497-518, 1968
桑原啓三・久楽勝行：岩石のり面の安定解析法，土木技術資料，pp133~139, 1973
安江朝光：ベクトルによる岩質の斜面の安定解析，第5回土質工学研究発表会，pp563~565, 1970
U. Zischinsky: On the Deformation of High Slopes, Proc. 1st Congr. Int. Soc. Rock Mech., pp179-185, 1966