

7. 不連続面に関わる岩盤の破壊現象

7.1 概説

不連続面は強度が小さいので、多くの岩盤破壊現象にこの不連続面が関与している。不連続面が岩盤の品質に決定的に影響することについては岩盤分類（6章）で述べた。豊浜トンネルの岩盤崩落事故は、崖の背面の不連続面が成長した結果、生じた。このように崖の崩落や岩盤斜面の滑り現象には不連続面が間接的・直接的に関与している。地下空洞で起こる落盤現象も不連続面が関与していることが多い。

ここでは、不連続面が強く関与している岩盤の破壊現象について、いくつかのトピックスを述べる。

7.2 不連続面と地形

地形の一部はしばしば不連続面で構成されている。特に、崖面や斜面などは不連続面であることが多い。岩盤強度がないのに比高の大きな急崖が形成されている場合には、崖を構成する不連続面と同じ成因を持ったものがその奥に密に分布している可能性が高い（不連続面の起源としては過去に造構作用を受けて生じた縦割などが考えられる）。基盤が軟岩である地域では、一般になだらかな地形をしている。天北地方がその典型例である。軟岩は風化作用や浸食作用の影響が著しいので、急峻な地形は削られ平らになりやすいためである。

豊浜トンネルの周辺一帯は軟岩で構成されている。波力により崖の下部には直ぐにノッチが入る。また、地下水量が豊富で、この主要な流路となっている層間が崖と交わる箇所では凍結融解作用により削剥が起こる。風化作用に加えてこういった破壊が進行しているにもかかわらず、豊浜地域で急崖が存在するのは、次のように解釈される。すなわち、既存の崖を構成する岩盤が崩落してその奥の不連続面が新しい崖面になるまでの時間が、浸食等により地形がなだらかになるのに要する時間より短い。豊浜トンネルの崩落は、このような地質構造や環境の下で生じたと考えられる。

7.3 キイブロックと寸法効果および不連続面の強度

7.3.1 キイブロック

走向・傾斜の異なる節理群が複数ある場合には、それらの面で囲まれたブロックが形成

され得る。特に、ブロックを囲む面の一つが空洞の壁面や斜面に一致し、かつ面の走向・傾斜がある条件を満たしているときには、そのブロックが空洞内に向かって、あるいは斜面の下部に向かって動き得る。このような運動を起こす条件を満たしているブロックはキイブロック (key block) と呼ばれる。キイブロックが動くと、その周囲のブロックが動きやすくなり、その結果、空洞や斜面は力学的に極めて不安定な状態になる。

図7.1は空洞壁に一部が現れたブロックの5つのタイプを示したものである。これらの内で、次のVとVIのタイプは周囲の条件が変わらなければ全く動かず安定している。

タイプV：寸法が無限に大きい

タイプIV：有限の大きさであるが、空洞に向かって狭まっている

次のIからIIIの3つのタイプは動く可能性を持っている。

タイプIII：踏前にあるため側面に摩擦が働かなくても重力下で安定している。ただし背後に力が作用すれば空洞内に押し出してくる。

タイプII：空洞内部に移動可能なので潜在的に不安定である。しかし、ブロック下部面の傾斜が緩いのでこの面の摩擦抵抗が極めて小さいか、押し出し力が背後から作用する場合しか動かない。

タイプI：自重で空洞内に向かって滑動し得るが、この運動に対する障害はない。したがってこの岩塊はキイブロックである。

キイブロックの幾何学的な特徴は、図のように断面が3角形の角柱や楔の形状を呈し、空洞に向かって広がっていることである。不連続面の走向・傾斜を基にキイブロックを見いだす一般的な方法に関する理論があるが、その紹介は省略する。

キイブロックが存在しそうな状況の下では、キイブロックを予想・発見し、このブロックをロックボルトによって奥の岩盤に縫い付けるなどの適切な対策を立てることが重要である。

7.3.2 寸法効果

キイブロックの寸法は、空洞や斜面の寸法と関係する。空洞の幅が不連続面の間隔より大きければ、天井に形成されるブロックが落下（落盤）する可能性があるが、空洞の幅が小さければ落盤の可能性はない。

このように空洞が大型化するほどキイブロックの寸法が大きくなり、重量が増すのでそれを支えるのが困難になる（図7.2参照）。つまり、空洞の掘削や維持が困難になる。地盤

の悪いところでなされるトンネル掘削におけるサイロット工法*やシールドトンネル掘削における中壁式工法は、大断面掘削に付随する施工の困難さを小断面にすることによって減らそうとする考えに立脚している。

キイブロックの寸法効果に関する別の例を図7.3に示す。節理性岩盤が塊状岩盤に接する地質構造になっている場合、節理性岩盤側に設けられている坑道を拡張すると、いままで安定していたのに突然、落盤が起こる危険性がある。落盤を起こす可能性のあるキイブロックの重量は空洞幅の2乗に比例する。支保の密度が一定であれば、支保による支持力の増加は空洞幅に比例する。このために空洞幅の増大に伴い落盤の危険が増大する。

*予定断面の両側壁部に相当する位置に小断面のトンネルを平行に掘削し、側壁に厚い覆工を施した後、天盤部を掘削して覆工を施し、周囲を固めた後で中を掘削し全断面とする。

7.3.3 不連続面の破壊条件

不連続面が密に発達している場合でも、不連続面に作用する抵抗力 F_r がせん断力 F_s を上回っている場合、つまり次の条件を満たしている場合には、不連続面が破壊することはない。

$$F_s \leq F_r \quad (7.1)$$

不連続面に作用する荷重が自重のみの場合には、不連続面の傾斜を δ とすれば、不連続面の上位の岩盤（重さを W とする）が面に沿って滑り落ちようとする力 F_s とそれを阻止する抵抗力 F_r は、それぞれ

$$F_s = W \sin \delta, \quad F_r = W \tan \phi \cos \delta \quad \phi : \text{不連続面の摩擦角}$$

で与えられる。これを(7.1)式に代入すると次式が得られる。

$$\delta \leq \phi \quad (7.2)$$

(7.2)式から、不連続面の傾斜 δ が摩擦角 ϕ より小さい場合、不連続面に作用する荷重が自重のみのときには、不連続面は破壊しないことがわかる。したがって、図7.1に示すキイブロックIは、その底面の傾斜 δ が(7.2)式を満たさなければ、不安定な滑り運動を起こさない。不連続面の破壊条件については7.5.3でも説明する。

7.4 構造物と不連続面の相対的な向き

不連続面と空洞切羽面や斜面の傾斜や走行の相対的な向きは、不連続面が関与する破壊

と密接に関係する。両者の関係で代表的なものを説明する。

7.4.1 流れ目と差し目

構造物と不連続面の向きの相対的な関係から、流れ目・差し目の区別が生じる。図7.4は1系統の節理を持った岩盤に溝を切るときの状況を示したものである。右側の側壁では、側壁と節理面から成るブロックが溝に滑り落ちてくる危険性がある。左側の側壁よりはそのような危険性はない。流れ目の場合には不連続面の上部の岩塊は落下しやすく、斜面では、平面すべりや楔すべりが起こり得る（図7.5参照）。また、流れ目は力学的に不安定なばかりでなく、不連続面に沿った地下水の流出が起こりえるので、これが斜面の不安定さを助長する可能性がある。

差し目の場合には鉛直な切羽面や急な斜面でトップリング型の崩壊（図7.7参照）が起こり得るが、これ以外の崩落形態はないので、一般に差し目の方が流れ目よりも力学的な安定性の観点から有利である。したがって、差し目になるような施工法や構造を採用した方がよい。

7.4.2 走向

空洞軸や斜面の走向と不連続面の走向が一致しているか、交差角が小さい場合の方が、平面すべり、楔すべり、トップリングなどの斜面の破壊が起こりやすい。空洞においては、不連続面が空洞全長に亘って現れる可能性がある。逆に交差角が 90° に近いと、これらの斜面破壊が起こりにくい。また空洞には不連続面が1～数断面にしか現れない。

7.5 弱面を含む岩盤に設けられ斜面が滑る条件

前節で述べた内容は、不連続面が関与する破壊が、不連続面と空洞壁や斜面との互いの走向・傾斜の関係に強く依存することを意味している。岩盤に含まれる弱面は節理のように比較的密な間隔を持ちかつ互いに平行に配列しているものとする。また、このような弱面が1～2群あるものとする。さらに、弱面は岩盤（の基質部）に比べて強度が小さいために、弱面が優先的に破壊するものとする。このような岩盤に斜面を施工した場合、図7.6に示すような斜面と不連続面から成るキイブロックが現れる。このブロックの下部を構成する不連続面がせん断破壊すれば、ブロックは滑落する。滑落し得るブロックの形状なら

びにブロックが滑落するのに必要な幾何学的条件などを以下に検討する。

7.5.1 平面滑り

一つの弱面系と斜面とが次の条件を満たすとき、弱面と斜面から成る断面が3角形をした岩塊が弱面に沿って滑落する、つまり、平面すべりを起こす可能性がある。

①弱面の傾斜 δ は斜面の傾斜 α よりも小さい(図7.6参照)。

②しかし、弱面の傾斜 δ は岩盤の摩擦角 ϕ よりも大きい。

$$\alpha \geq \delta \geq \phi \quad (7.3)$$

③両方の傾斜ベクトルが 90° 以内で一致。

7.5.2 2つの弱面系統に沿う楔滑り

2つの弱面系と斜面のなす楔状の岩盤ブロックが2系統の弱面のなす交線に沿って滑落する楔滑りが起こるには、楔状の岩盤ブロックが形成される必要がある。この形成が起こりえるには次の条件を満たしていなければならない。

①2系統の弱面のなす交線の傾斜 δ は斜面の傾斜 α よりも小さい。

②しかし、交線の傾斜 δ は岩盤の摩擦角 ϕ よりも大きい。

③両傾斜は同一方向にあり、楔状のブロックが形成し得る。

(平面すべりの条件とよく似ていることに注意されたい)

7.5.3 トップリング (転倒)

トップリングは次のようなプロセスに従って起こると考えられている (図7.7参照)。

①一つの弱面系統の不連続面でスリップが発生

②スリップに伴う変形の進行により曲げ応力が発生し、それにより破壊

③破壊した岩塊が転倒

最初の現象①は次の条件を満たすとき起こり得るとされている。

①弱面の傾斜 δ が大きい。

②弱面の傾斜方位は斜面の傾斜方位と反対を向いている。

③斜面と弱面の走向ベクトルは 30° 以内で一致している。

トップリングの初期過程であるところの弱面のすべりが斜面近傍において発生する条件について検討する。

斜面近傍では地圧の最大主応力は斜面に平行に作用している（斜面上ではせん断応力が0、また、主応力の一つである斜面に垂直な直応力も0である。したがって、必然的に斜面に平行な主応力が最大主応力になる）。

この最大主応力 σ_1 が不連続面を滑らせようとする力 F_s は $F_s = \sigma_1 \sin \beta$ 、抵抗する力 F_r は $F_r = \tan \phi (\sigma_1 \cos \beta)$ である。ここに β は最大主応力 σ_1 の向きが弱面の法線となす角（図7.8参照）、 ϕ は弱面の摩擦角である。滑りの条件は(7.1)式から次のようになる。

$$\beta > \phi \quad (7.4)$$

角 β は

$$\beta = \alpha + \delta - \pi / 2$$

であるので、これを(7.4)式に代入すれば次式が得られる。

$$\alpha - \phi > \pi / 2 - \delta \quad (7.5)$$

斜面の傾斜 α 、不連続面の傾斜 δ とも急であるほど、滑りが起き易い、すなわちトップリングが起き易いことがわかる。

7.6 節理の発達した岩盤に設ける空洞の最適形状と空洞で起こる落盤

7.6.1 空洞の最適な形状

鉱山における空洞の設計では、空洞の維持費（支保の材料費や施工費など）を最小限に押さえることに最大の重点が置かれる（土木用の空洞は、機能性の長期発現や形状の優美さなどが設計上考慮すべき重要な要素になる）。系統だった節理が発達した岩盤を対象とする場合には、上記の要求を最大限に満たす空洞形状があり得る。これを空洞の最適形状と呼ぶことにする。

図7.9(a)に示す岩盤には、右上から左下に急角度で傾斜している連続性のある節理群と、これを切るような向きを持ち傾斜が緩くかつ連続性の悪い節理群が分布している。このような岩盤に対しては、下記のように、図に示す空洞の形が最適形状といえる。天井部と側壁の上部は2系統の不連続面と一致しているので、ここではキイブロックとなり得る三角形ブロックが形成されない。右側天井部では短冊状のブロックが形成されるが、このブロックは次の理由で落下しにくい。①摩擦抵抗はブロックの上下2面で生じるが、この面はブロックを押し出す機能を持った面に比べて圧倒的に大きい②地圧が僅かでもあれば、①

の特徴により、ブロックの押し出しを阻止する強力な力が生じる。③ブロックが滑り始めると不連続面が膨張し滑りの抵抗として働く。

踏前（床）では3角形のブロックが生じるが、このブロックは図7.1タイプⅢの範疇に属するので動かない。左側壁の下部ではキイブロックが形成し得るが、天盤や側壁上部に存在する場合に比べて、それが押し出してくることに伴う悪影響は小さい。

図7.9(b)に示す岩盤に分布する2系統の節理群の特徴は図(a)とほぼ同じである。この岩盤に板状鉱床が賦存し、その走向・傾斜が優勢な節理群と同じであるとする。この鉱床を上向き充填採掘法で採掘する場合、切羽（採掘場所）の形状を図(b)のようになると、天盤には3角形のブロックが現れない。採掘跡として形成される空洞は、採掘とともに長くなり、左側壁（天盤）ではブロックの落下が起こり得る。しかし、ブロックは空洞の下部を充填しているずりに抑えられ安定を保つ。

7.6.2 落盤

空洞掘削に伴い、斜面掘削時と同様の岩塊の滑りが側壁や天盤で起こり得る。さらに天盤では、滑りを伴わない落下、すなわち、落盤が起こり得る。

3系統の不連続面がある場合には、図7.10に示すように、不連続面と天盤が閉じた4面体を形成する可能性がある。いま、この4面体の3つの側面には外側から十分な圧縮応力が作用していない状態になっているとする。4面体の頂点を通る鉛直線が底面に含まれている場合には（図a）、自重の作用の下でそのまま鉛直下向きに落下するであろう。そうでないときには（図b）、4面体の下側の面Aには自重の一部が摩擦抵抗として働き、残りが4面体を滑落させる働きをする。したがって、滑落が可能な運動形態であるが、これの起こる容易さは、抵抗がある分だけ前者に比べて小さい。

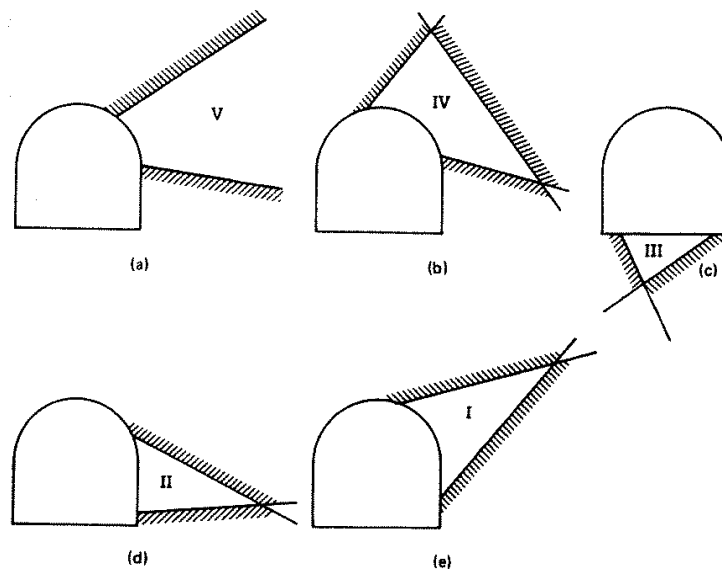


図7.1 岩盤ブロックの5つのタイプ。I = キイブロック、II = キイブロックになる可能性のあるブロック、III = 安全に除去できるブロック、IV = 先細りブロック、V = 無限の寸法を持つブロック

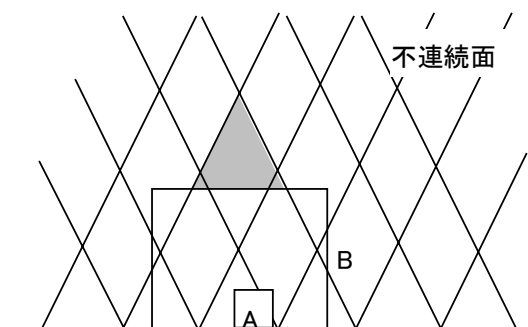


図7.2 2系統の不連続面のある岩盤内に設けた空洞。寸法の小さい空洞Aでは落盤が起こらないが、大きな空洞Bではハッチの部分が落盤する可能性がある。

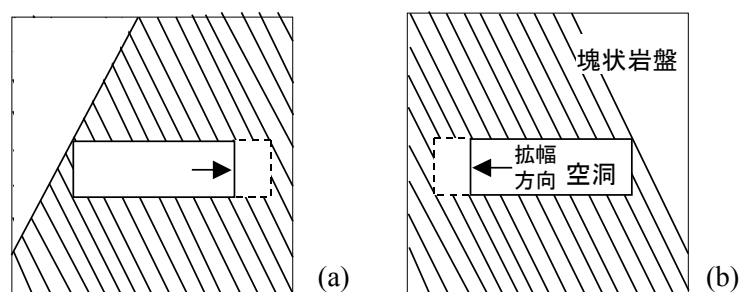


図7.3 塊状岩盤に接する節理性岩盤内での空洞拡幅は落盤の危険性が増大する。(a)の場合には、塊状岩盤と節理性岩盤の境界面、節理面、空洞天井から成るブロックが落下する危険が増大する。(b)では(a)のようなブロックはできにくい。

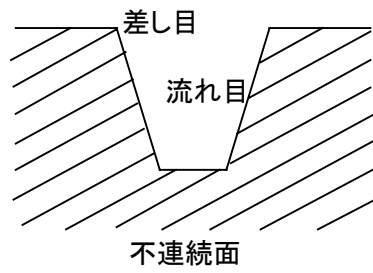


図7.4 節理性岩盤に掘削した溝。左右側壁に差し目と流れ目の岩盤が現れる。

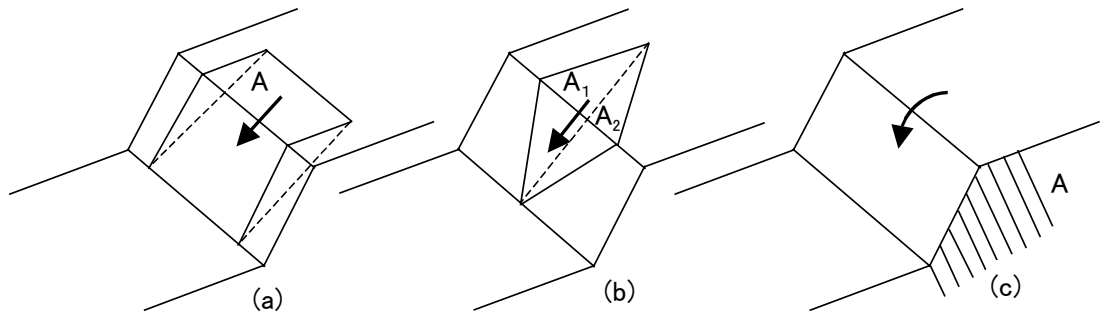


図7.5 系統的な不連続面（弱面）を施工したときに発生しうる3種の滑りモード。

(a)平面滑り,(b)楔滑り,(c)トップリング

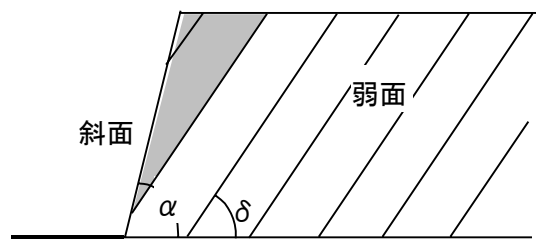


図7.6 平面滑りの起こる条件（ $\alpha > \delta$ のとき）。ハッチの部分が滑る可能性がある。

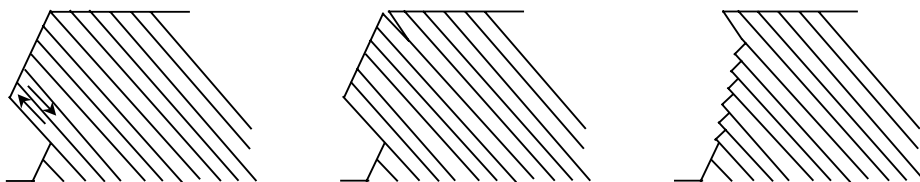


図7.7 トップリングの発生過程

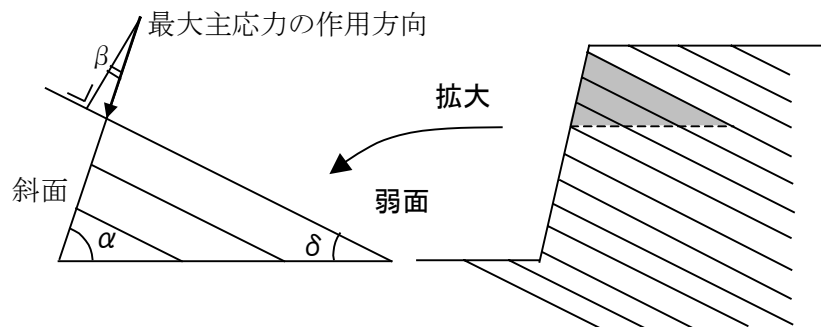


図7.8 傾斜 α の斜面近傍において傾斜 δ の弱面に作用する力(topplingの機構)

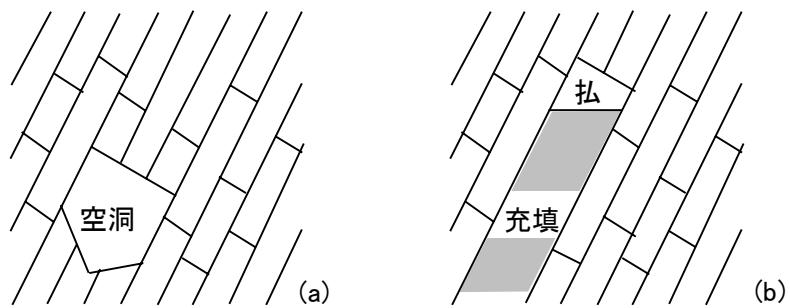


図7.9 2系統の節理群から成る岩盤に設ける空洞の最適な形状(a)とcut-and fill 採掘切羽の形状(b)

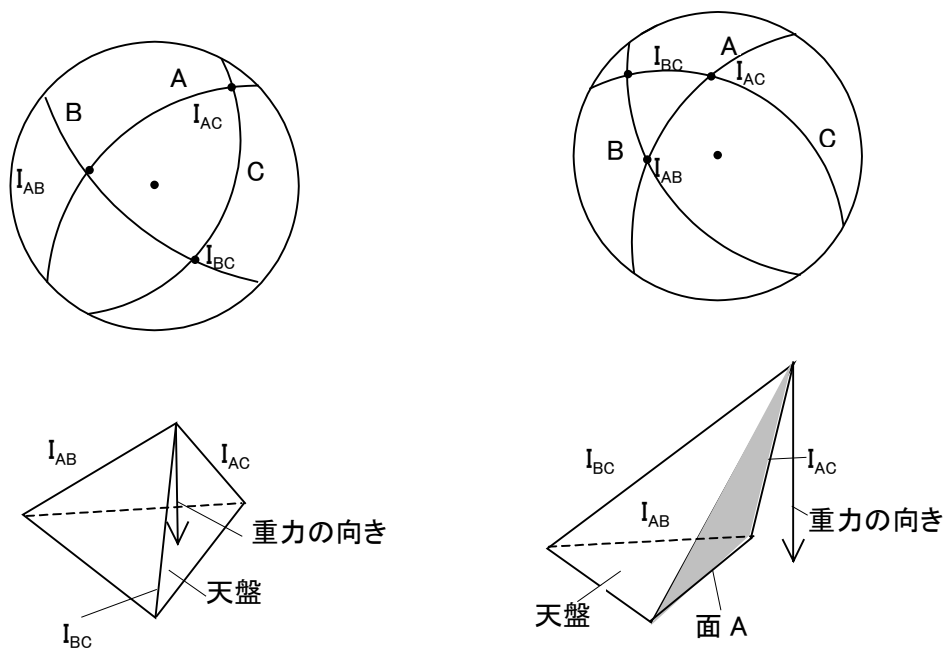


図7.10 3系統の不連続面がある岩盤内に設けられた空洞の落盤