

切羽の不安定現象の分類と対策に関する考察

CONSIDERATIONS ON CLASSIFICATIONS AND COUNTERMEASURES OF FACE'S UNSTABLE PHENOMENON

竹林 亜夫¹⁾・山本 和義¹⁾・泉谷 泰志²⁾・上岡 真也¹⁾

Tuguo TAKEBAYASHI, Kazuyoshi YAMAMOTO, Yasushi IZUMIYA and Shinya UEOKA

In the mountain tunnel, the face stability is necessary until the support will confine the ground. However, there were considerably many cases which fall into the accident construction by face's collapse. An unstable phenomenon including face's collapse is an important problem in the tunnel construction, it causes serious influence to the safety, delivery and cost etc. of the tunnel construction. We try to classify the unstable phenomenon experienced by the many tunnel constructions in our country, and consider the unstable phenomenon. We will propose the new countermeasure of the face stabilization by considering the ground conditions which trigger unstable face.

Key words : tunnel, unstable face, facebolt, forpiling, umbrella-method

1. はじめに

山岳トンネル工法が適用される前提条件は掘削後支保工の施工が終了するまでの一作業サイクルの間、切羽が自立することにある。しかし昔より山岳トンネル工事において、切羽の崩壊により難工事に陥った事例は枚挙に遑がない。現在においても切羽の崩壊を含む不安定現象は、トンネル工事上の重要な問題で、工事の安全、工期および工費等に大きな影響をもたらす場合がある。

わが国の地質条件は、軟弱地盤から硬岩までの各種の堆積岩、変成岩、火山岩、深成岩類が複雑に分布し、それぞれ地質構造運動により不連続面や熱水変質帯が形成され、かつ地下水位も高い状態にあるためトンネル掘削時に遭遇する切羽の不安定化要因には多種多様なケースがある。それに比して不安定の結果である切羽の崩壊形態は数種類に分類できることから、類似地山条件の施工事例における不安定現象を参照した上で、切羽の安定性評価を検討すると判定も比較的明確になり、不安定現象の初期段階で対応出来て、工期、工費面で貢献するだけでなく、切羽作業の危険予知にも役立つことになる。

本文では、わが国のトンネル工事事例から、切羽の崩壊を含む不安定現象を主に施工面から分類し、切羽の不安定現象に関する考察を行い、切羽の不安定現象と支保との関連性にもふれつつ、切羽の崩壊を防止するための切羽観察の要点および最近の新しい技術を含む対策工法の選定上の要点を述べている。

2. 切羽の不安定現象の分類と地山条件

2. 1 切羽の不安定現象の分類

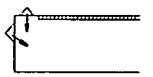
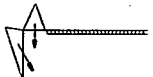
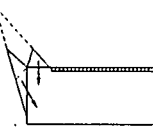
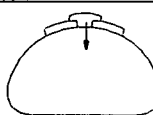
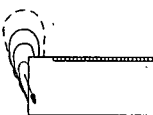
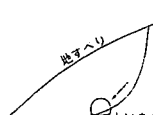
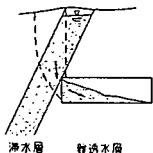
切羽の不安定現象を、肌落、小崩落、崩壊の3つに分類して、それぞれの定義を以下のように行った。

- ①肌落ちは基本的にはブレーカ等のコソク作業で処理できる岩片、小岩塊の崩落。
- ②小崩落は天端および鏡面の吹付けコンクリートで安定化する程度の岩塊およびブロックの崩落。
- ③切羽の崩壊は、その対策に各種の補助工法が必要となる部分崩壊から大崩壊。

1) 正会員 清水建設(株) 土木本部 技術第二部
2) 清水建設(株) 土木本部 技術第二部

この内容に従って、わが国のトンネル工事事例から切羽の不安定現象を分類し、それぞれの地山条件と主な対策工法をまとめ表一に示す。

表一 切羽の不安定現象の分類と地山条件

切羽の不安定現象		不安定化概念図	地山条件	主な対策工法	トンネル事例
肌落ち	切羽の鏡面または天端から浮石が肌落ちする。		・道路公団の地山分類において地山等級B以下の切羽	・コソクの徹底	・ほとんど全現場
	不連続面や割れ目に囲まれた1 m ³ 以内の岩塊が天端または鏡面から崩落する。		・同上の地山分類において岩盤等級C以下の切羽	・コソクの徹底 ・一次および鏡吹付けコンクリート	・ほとんど全現場
切羽の崩壊	崩落 不連続面に囲まれた岩塊が天端または鏡面から崩落し、続いて数ブロックが崩落する。また乾燥不飽和砂等が円錐状に崩落する。		・硬岩～軟岩地山で不連続面が交差して分布している地山、不連続面に粘土を含むことあり ・粘着力のない不飽和砂、粒状土	・キーストーンをロックボルト等で縫い付ける。 ・フォアポーリング ・鏡ボルト ・地盤注入工法	・笹子T 他 ・硬岩～軟岩地山の多くのトンネル ・地下水位低下後の都市トンネル他
	山ハネ 掘削直後に掘削面から突然音響と共に岩片が飛び出したり剥離する。		・土被りの大きい硬岩地山、および水平初期応力の卓越した硬岩地山等	・スウェレックスボルト等早期定着ボルト ・ファイバー入り吹付けCON	・関越T ・大清水T ・雁坂T 他
	すべり崩壊 切羽の一部がすべり崩壊し、崩壊域が拡大したり一度に押し出して崩壊する。		・地山の大部分が破碎変質を受けて、低強度化したり、片理面、弱層面が油目状で流れ目状の岩盤や膨張性地山等。	・閉合した剛性的支保工 ・長尺7φ75アイリング ・長尺鏡ボルト鏡 ・ファイバー入り吹付けCON	・恵那山T ・鍋立山T ・嶺岡T ・藤白T ・嵐山T ・岩手T 他
	地すべり崩壊 トンネル掘削により地すべりを誘発し、切羽が崩壊する。		・地すべり域、または崖錐性地山等	・坑内では同上 ・地すべり安定対策工	・浅利T ・嶺岡T ・山中T ・谷稲葉T ・日暮山T 他
	土砂流出 切羽前方または上方の未固結含水層が切羽を破壊して土砂流状に崩壊し、時には地表陥没を伴う大崩壊。		・未固結含水層と難透水層の互層地山 ・未固結含水層が不整合にトンネル天端上に分布 ・未固結含水層を有する破碎帯等	・調査兼水抜きボーリング ・水抜坑 ・薬液注入 ・長尺フォアパイルリング	・恵那山T ・日本坂T ・浦佐T ・堀之内T ・中山T ・加久藤T ・安房T 他

肌落ち切羽は切羽の不安定現象の中で最も軽易な現象であるが、切羽の安全作業上確実なコソク処理が必要である。道路トンネルの地山分類¹⁾において地山等級B以下に肌落ちが記述されているように、わが国のトンネル現場のほとんどの切羽に該当し、それぞれコソク作業で処理されている。掘削直後にコソクを行い、その後時間の経過とともに浮石が多く発生する場合には、吹付けコンクリートを行うことが定着してきている。

またコソク作業で肌落ちを防止した後にやや不安定な岩塊およびブロックが天端または鏡面に残り、それを除

去するとかえって不安定な切羽状態になる場合に、天端および鏡面に吹付けコンクリートを行うこともある。岩塊が大きくて吹付けコンクリートのみで支保できない場合にはロックボルトおよびフォアボーリング等を併用している。また小崩落が断続的に発生する等、崩壊現象の前兆である場合には、吹付けコンクリート等で土留めを行い本格的対策工に備えている。

切羽の崩壊現象を岩盤工学的に分類すると、つぎの5つに分けられ、崩壊域が小規模な場合と大規模な場合があり、中には急激に大規模崩壊に至るケースもあるので注意を要する。

- ①崩落：硬岩から軟岩の多節理系の不連続性地山でキーストーンが崩落したために、続いて数ブロックも崩落する。すべり面となる不連続面の組み合わせと切羽の位置形状の関係で不安定化するブロックが大きい場合には、大規模崩壊に至ることがある。また不飽和未固結砂等の乾燥状粒状土が自立できなくて切羽の天端部などに徐々に円錐状崩落を広げる。地下水位低下工法を採用した都市域の未固結地山トンネルでも、切羽は不飽和土となり粒子間の粘性が低下して切羽の崩壊に至ることがある。
- ②山はね：山ハネは土被りが非常に大きく初期応力の大きい硬岩地山で掘削直後に切羽面、天端部および側壁部等の岩盤が爆音とともに急激に破壊し、破壊された岩片または岩塊が飛び跳ねる現象。
- ③すべり崩壊：切羽の一部がすべり崩壊をし、崩壊域が拡大したり、一度に押出して崩壊する。このような現象は土被り厚さに比して強度の低い地山、破碎、変質を受けて低強度化した地山や片理面、弱層面が油目状で流れ目状態の岩盤および膨張性地山等にみられる。
- ④地すべり崩壊：地すべり域において、トンネル掘削の影響で地すべり挙動を誘発し、切羽が崩壊することがある。とくにトンネルの坑口部では土被りが薄く、崖錐等で地山強度も低いために、トンネル掘削の影響で周辺地山の緩みが広がり地すべり挙動が発生し易い。
- ⑤土砂流出：未固結合水層と難透水層の互層地山や帯水破碎帯および割れ目の多い地山が湧水とともに土砂流出し、徐々に崩壊域を広げたり、急激に大崩壊に至ることがある。いずれにしても崩壊は突然発生して多量の土砂が瞬時に流出することがあるので、細心の注意が必要である。

2. 2 不安定現象と内空変位

切羽の不安定現象の内、すべり崩壊や押出し現象が見られるトンネルでは、一般に内空変位量が大きい傾向にあるので、トンネル工事における内空変位の計測結果を調べた。砂岩、花崗岩、安山岩等の内部摩擦角(ϕ)が大きい地山(粒状片や結晶で岩石が構成されているために割れ目でも ϕ は大きい)では 図-1 のように地山強度比が小さくても工事の上で問題となるような内空変位量の数値にはならないが、泥岩、頁岩、粘板岩、凝灰岩等は主に粘土や粘土鉱物で岩石が構成されているために割れ目に粘土が介在し、内部摩擦角は小さく、図-2 のように地山強度比が小さいと変位量は著しく大きくなっている。^{2) 3)} また、内部摩擦角の大きい地山の切羽不安定現象には、肌落ち、小崩落、崩落、山ハネ等があり、内部摩擦角の小さい地山の不安定現象には、肌落ち、小崩落、崩落、すべり崩壊、地すべり崩壊等がある。特に、流れ盤状の不連続面があり、その内部摩擦角が小さい地山では、切羽のすべり崩壊が発生し易く、また、地山強度比が小さくてかつ内部摩擦角も小さい地山では、嶺岡トンネル^{4) 5)} 等のように押し出し現象がみ

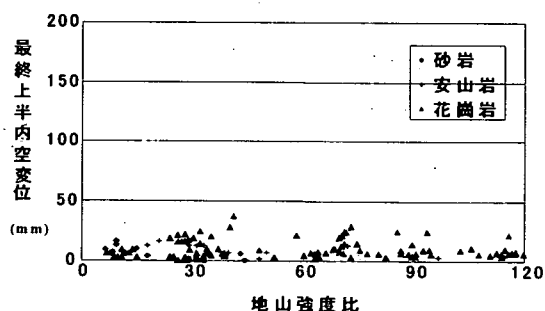


図-1 内部摩擦角の大きい地山の内空変位

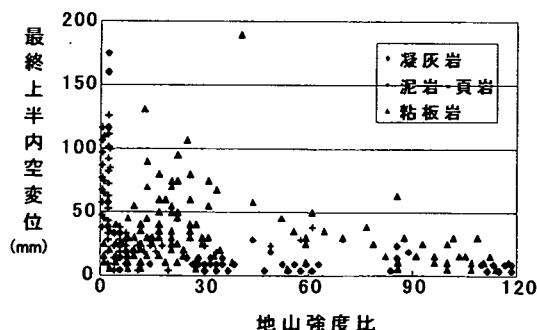


図-2 内部摩擦角の小さい地山の内空変位

られる。この内部摩擦角は連続性地山の場合には三軸圧縮試験等で、割れ目の多い地山の不連続面では一面せん断試験等で求められる。内部摩擦角が小さい鉱物には、滑石や絹雲母や表-2の粘土鉱物の中からモンモリロナイトやクロライト等があり⁶⁾、このような粘土鉱物が介在した割れ目を有する岩盤や、熱水変質および変成作用によりこれらの粘土鉱物が混入した岩盤は、内部摩擦角が小さくなる。

表-2 粘土鉱物の粘着力と内部摩擦角との関係⁶⁾

粘土鉱物混合率 (%)	含水率 (%)	粘着力 (kPa)	内部摩擦角 (°)
M (モンモリロナイト)	150	10.1	2.5
(100)	200	5.5	2.0
I (イライト)	30	5.5	23
(100)	35	3.0	16
K (カオリナイト)	60	7.0	15
(100)	70	3.0	7
Ch (クロライト)	50	5.0	8
(100)	90	2.6	4

3. 切羽崩壊に関する考察

3.1 崩壊現象の考察

切羽の崩壊は、湧水の影響を受けるものと、影響を受けないものに分類する必要がある。湧水の影響を受けない崩壊は、トンネル掘削による応力再配分状態に対して、岩石強度が十分で岩石は破壊しない場合と、岩石そのものが破壊する場合に大別できる。

(1) 崩落

崩落には、キーストーンの抜け落ちや不飽和砂の崩壊がある。キーストーンの抜け落ちはトンネル上部で重力の影響を受け、かつ独立したブロックが存在する場合に発生する。不飽和未固結砂でも同様に、砂地山で粘着力は小さく、掘削に伴い粒子間の粘着力が減少し、天端部で重力により崩落が発生する。崩落の特徴としては亀裂(粒子間)の内部摩擦角は比較的大きいが、粘着成分が少ない場合の崩壊形態である。

(2) 山はね

山はねはトンネル掘削に伴う応力の再配分による応力集中が岩石強度を越える場合に発生するもので、岩石強度と初期応力状態およびトンネル形状の関係で、掘削壁面が脆性破壊する崩壊である。

(3) すべり型崩壊

切羽に流れ盤状の弱層がある場合には、弱層をすべり面として崩壊し易い。また、地山の大部分が破碎変質を受けている場合や熱水変質している場合に、地山強度はマトリックス分に支配されるため、岩片は強度があっても、変質部で掘削による応力再配分により塑性破壊が生じ、弱層部に沿ったすべり的な崩壊が生じる。後述するように内部摩擦角が小さい場合には、塑性領域が大きく広がるため崩壊規模は大きくなる傾向にある。

(4) 土砂流出崩壊

土砂流出崩壊は、未固結含水層や帯水破碎帯での出水を伴う土砂流出現象で、帯水層の透水係数に大きく影響を受ける。帯水層の透水係数が排水状態が良いとされる⁷⁾ 10^{-3} cm/sec より大きい場合には、水抜きボーリング等で地下水は速やかに排水され切羽付近の間隙水圧が急速に低下することにより有効応力が増大し、流出には至らないことがある。逆に透水係数が排水状態が悪いとされる⁷⁾ 10^{-5} cm/sec より小さい場合には、問題となるような湧水も発生しない。この境界に位置する⁷⁾ 10^{-4} cm/sec オーダーの透水係数の帯水層では排水工法を採用していても、帯水層の粒子間の間隙水圧が低下し難い状態にあるところに、トンネル掘削によるゆるみの影響で、切羽付近に一種のボーリング現象が生じ、その液状土が切羽部の割れ目を拡大しつつ、一次流出が発生する。

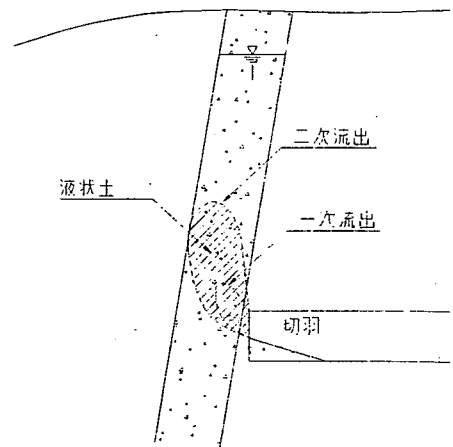


図-3 土砂流出の進展の模式図

この一次流出により生じた帯水層内の空洞部が、図-3のように湧水と共に崩積土で充填された液状土域を拡大し、その液状土圧が切羽を破壊しつつ急激な二次流出となる。この崩壊は最終的には地下水圧が低下するまで断続的に継続する。崩壊の規模は未固結合水層の層厚、層の走向・傾斜、地下水圧の大きさによって定まる。崩壊は比較的規模の大きな崩壊となる場合が多く、時には地表面陥没に至る場合がある。

3. 2 切羽近傍の塑性領域の分布

切羽の崩壊現象は、地下水に関係しない場合には地山としてのせん断抵抗に関係することから、切羽近傍の塑性領域に及ぼす内部摩擦角と地山強度比の影響を把握するため3次元 FEM 解析を行う。解析に当たっては地山強度比をパラメータとし、同じ地山強度比でも内部摩擦角を変化させ塑性領域の大きさを比較検討した。解析は地山を線形弾性体、半径5mの円形断面とし、支保としては15cmの吹付けコンクリートを想定した。ここで $qu=Gh*\gamma*H$ とし、一軸圧縮強度 qu と内部摩擦角 ϕ 、粘着力 c の関係は $qu=2*c*cos\phi/(1-sin\phi)$ とし、内部摩擦角を変化させた。解析条件を表-3に示し、このときの塑性領域の大きさを図-4、5に示す。

表-3 解析条件

地山強度比Gh	単重 γ kN	土被りH m	ポアソン比 ν	初期 側圧係数	変形係数E MPa
0.3, 0.5, 0.7, 1.0	23	200	0.3	1	$E=100*qu$

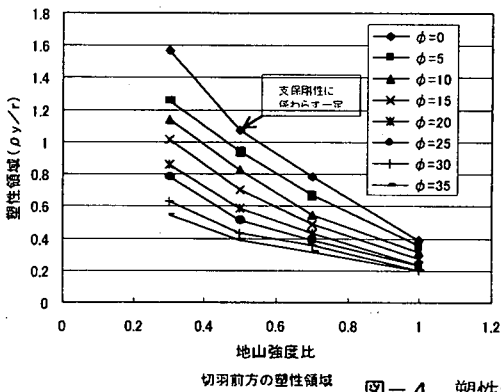
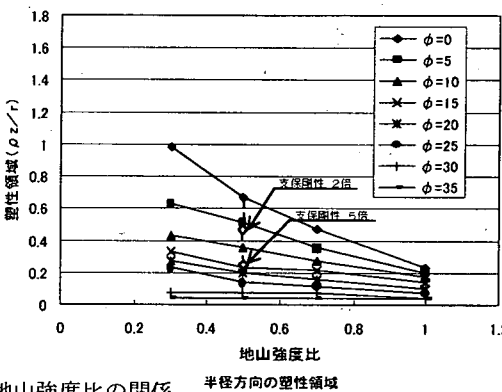


図-4 塑性領域と地山強度比の関係



塑性領域の深さは切羽前方の方が半径方向よりも大きくなり、支保による拘束の効果があらわれている。また、切羽前方の塑性領域が大きくなっていることは、トンネルの支保剛性を大きくしても、切羽面では塑性化が発生することを示しており、切羽の安定性には半径方向の支保剛性のみならず、特に地山強度比が小さい場合には切羽面に対する対策が天端安定対策と同程度に必要であることを示唆するものである。切羽面に対する対策も地山強度比が0.3で内部摩擦角が15°以下の場合トンネル半径以上の深度で塑性領域が発生しており、これを抑制するには、一般に用いられる3m程度の鏡ボルトよりも長尺の鏡ボルトや長尺フォアパイリングで切羽前方の変形を抑制することが重要である。

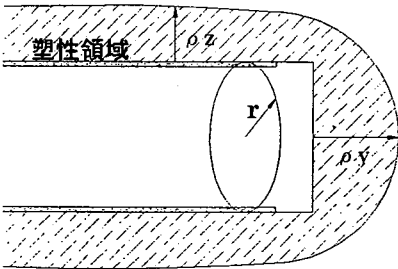


図-5 塑性領域の分布

また、同じ地山強度比でも、内部摩擦角を変化させた場合には塑性領域の大きさが変化し、内部摩擦角が小さくなるほど塑性領域の大きさが大きくなる。この変化の度合いは地山強度比が小さい場合に大きくなり、地山強度比が大きくなるとその差は小さくなる。したがって、地山強度比が小さい場合ほど、切羽の不安定現象は内部摩擦角に影響を受けることを示唆している。地山強度比が小さくて内部摩擦角が小さい地山の切羽では、塑性領

域が大きいために、塑性域内ですべり崩壊が発生しやすく、崩壊後の形状が不安定な場合には二次崩壊を招き、崩壊域が拡大することがある。

4. 切羽観察の要点

このように、トンネル切羽の安定は地山条件と密接に関係しているために、切羽観察にあたっては、岩石の分布や硬軟にとらわれることなく、トンネル全延長の褶曲、断層、不整合などの地質構造、風化変質や掘削後の劣化、土被り厚さ、湧水量、湧水圧などの地山条件を理解した上で、切羽背後の地質状況の変化を予測することが大切である。また、既掘削区間の計測結果も地質やトンネルの安定と密接に関係しているので、常に把握しておく必要がある。

4. 1 硬岩・中硬岩地山

岩石強度は十分に大きいため、切羽安定で問題となるのは割れ目による岩塊の崩落である。肌落ちや小崩落に対しては、個々の割れ目を観察するよりも、割れ目頻度や割れ目の性状に注意し、不安定化しそうな範囲をコンソク処理する。ブレーカ等のコンソク作業で処理できる岩片、小岩塊の崩落を肌落ちと称している。

崩落に対しては、すべり面あるいはキーストーンを形成する不連続面に着目し、1つの切羽あるいは2～3切羽の間で観察できるキーストーンをその都度識別し、対策工の必要性を判定する。数日間の掘削進行の結果キーストーンが判明するような大きなものは、地質縦断図・展開図に整理して識別する必要がある。キーストーンを識別するコンピュータプログラムも実用化されている。キーストーンを地質展開図に整理して識別するには不連続面の走向傾斜の記録が必要である。

硬岩・中硬岩地山において、山はねは、岩石強度と土被り厚からある程度発生の予見が可能である。山はねの前兆現象として、山鳴りが認められる場合が多いので、そのような異常な音や振動に注意すると共に、AE計測等を採用する。また、土被り厚による垂直応力より水平応力のほうが大きくて山はねが発生することもあるので、土被りが小さい場合でも前兆現象には注意しておく必要がある。

また、硬岩、中硬岩地山でも粘土を介在した割れ目があり、特に流れ目状分布の場合にはロックボルト等の対策を行う。

4. 2 軟岩地山等

軟岩地山では、岩石強度と土被り厚によるトンネル周辺の応力状態がトンネル切羽の安定に大きく影響することを念頭において切羽観察を行う必要がある。地山の物性値を把握するため、点載荷試験や針貫入試験などの簡易試験で地山の強度を把握することも有効な方法である。また地山強度比だけではなく、内部摩擦角も地山試験で求めておくことが望ましい。膨張性地山等では、鏡肌等を有するせん断面に密に形成されている場合が多いので、掘削時にはそれらの面の分布状態、特に流れ目等を観察し、鏡ボルト等の対策に役立てる。

切羽だけではなく既掘削区間の計測結果も把握しておくことが大切で、1施工サイクル内での変位にも留意する必要がある。施工サイクル中に切羽変位が進行して崩壊に至ることがあるので、既掘削区間の吹付けコンクリートの変状のほか、切羽の押出し性変位に注目する。簡易な計測器を用いて計測する方法もあるが、簡便な方法として鏡吹付けコンクリートによりクラックの発生状況を観察する方法がある。

軟岩では割れ目の観察が軽視される傾向があるが、軟岩や膨張性地山でも、割れ目による岩塊の崩落もあるので、硬岩・中硬岩と同じように割れ目に関する観察も必要である。

4. 3 土砂地山

地下水位低下後の未固結の土砂地山では、もともと切羽の自立性に難があるので、切羽や天端の自立状況や、時間経過とともに肌落ちが増加しないかなどをまず確認する。同一切羽内でも粒径や固結度の異なるいくつかの

層が分布していることが多いので、各層の分布と自立性に注意する。土砂地山では、支持力が不足してトンネル全体が沈下することがあるので、既掘削区間の計測結果も把握しておき、支保工足元の地層分布等も観察する。

4. 4 帯水破碎帯等

土砂流出は地下水压に影響されるので、地下水位とトンネルの位置関係および地表の地形の変化を念頭においておく必要がある。湧水がある場合には、湧水個所・湧水量のほか、土粒子の流出状態、湧水量の経時変化などにも着目する。

切羽到達以前に地下水压を低減しておくことが切羽安定に必要なので、地質調査と水抜きを兼ねた先進ボーリングや探り削孔で切羽背後の地質を確認しながら掘削することは、土砂流出対策の要である。

湧水をとまう土砂流出では、発生後に一時的に湧水量が減少することがあるが、これは地山内で崩落が起こって一時的に水みちが閉塞されたためで、新たな液状土が形成され、突然、急激に二次流出することがある。したがって、一時的に水量が減ったからといって切羽に近づいたり、崩壊土砂を取り除くことは慎重に行う必要がある。最終的な崩落土砂の除去は地下水位低下を確認するか、薬液注入などの対策工が完了してから行いたい。

5. 切羽崩壊防止工法

5. 1 崩落防止対策

崩落は、亀裂面が開口し、落下することであるため、亀裂の開口を抑制すると共に、岩片を縫い付けるランダムボルト等の対策が効果的である。この場合亀裂の方向や傾度を十分観察し、天端からの落下以外にも切羽面からの落下防止も考慮する必要がある。亀裂間隔が小さくなるにつれて、不安定岩塊の縫いつけだけでは対応が困難となり、亀裂間の粘着成分を改良する必要も生じる。この場合には注入式フォアボーリング等で亀裂の粘着性やせん断抵抗力を増す対策も必要となる。不飽和未固結地山では、注入式長尺フォアパイリング⁸⁾や水平ジェットグラウト⁸⁾等で面的に限られた範囲の地盤改良を行ったり、地山全体の改良が必要な場合には地山注入工法が有効である。このような方法で切羽の不安定対策を行うと、その後のトンネル支保作業も安全で確実に行うことが出来、トンネル支保の品質も向上する。

5. 2 すべり崩壊防止対策

切羽周辺の地山が塑性化することにより誘発される崩壊に対しては、トンネル掘削による塑性領域の発生を極力抑制する対策が必要となる。塑性領域はトンネル半径方向よりも、むしろ切羽前方に大きく広がる傾向があることから、トンネル半径方向のみならず切羽面を含めた切羽前方ゆるみ対策も重要である。トンネル半径方向に対しては支保剛性を高めるとともに、断面閉合を行うことにより内圧を高め、変形を抑制することが必要である。

切羽前方の拘束を高めるためには、切羽面支保の考え方が重要であり、長尺フォアパイリング、長尺鏡ボルトを行うことが有効な対策となる。従来、トンネルの支保構造はトンネル半径方向のみに設定され、切羽の自立性確保は補助工法として、支保設置までの間、自立させれば良いとの考え方であるが、本来、掘削によって応力の再配分は切羽面にも当然生じることから、切羽面支保の概念が重要になる。

塑性化する地山の切羽面支保は、すべり崩壊や押し崩壊等の不安定現象が顕在化してから行っていたが、今後は、長尺フォアパイリングや長尺鏡ボルト等で塑性域減少に努めることがトンネル支保の品質向上に有益である。

5. 3 土砂流出崩壊対策

土砂流出対策では、事前に帯水層の存在を予知することが最も重要である。このためには事前の調査結果から、帯水層に遭遇する可能性を検討すると共に、切羽観察で亀裂の状況、湧水状況をよく観察することが基本となる。また、断層粘土で遮水帯が形成されている場合には、崩壊直前まで切羽の湧水がほとんどない場合があるので注

意が必要である。

対策としては、まず地下水圧を低下させることが必要で、調査を兼ねた水抜きボーリングを行ったり、長尺フォアパイリング等も湧水の予測に有効である。この調査兼水抜きボーリングの結果から更なる水抜きが必要とされる場合には水抜きボーリングや水抜き導坑により水位低下を図る必要がある。この場合に帯水層の透水性の評価に留意する必要がある、水抜きボーリングからの湧水が減少し、平衡状態になっていても、透水係数が小さい場合には、地下水位は低下していないことがあり、また、地下水位が低下した場合でも破碎されて切羽の自立が確保できない場合があるので、長尺フォアパイリング等を行い天端の崩壊防止を検討することも必要であり、さらに注入工法により湧水を抑制することも対策の一つとなる。

土砂流出では、一次流出から二次流出に直接いたるのではなく、一旦流出がとまり、濁水のみが流れ出るような状況を呈する場合があり、不用意に切羽に近づくと急激に二次流出が発生し、災害をもたらす場合がある。一次流出した段階では、まず、土砂流出の拡大を防止する仮土留めや土堰堤を構築し、地下水位が確実に低下したことを確認することなく、流出土砂を取り除くことは、二次流出を引き起こす場合があるので注意が必要である。特に二次流出は人身事故や重大事故になりやすいので、崩壊防止には極力努めなければならない。

6. おわりに

トンネル掘削技術の主な問題である支保の妥当性と切羽の安定性のうち、支保の妥当性は管理基準に基づいて設計支保パターンが適用されたり、多くの類似事例を参考とし、かつ施工時の計測管理で確認されていることから評価手法はほぼ確立されている。それに対して切羽の安定性については、それぞれの工事で参考設計がある程度で、評価手法は未だ確立されていないために、安全で経済的な対策工の選定にばらつきが見られ、時には崩壊を招くことがある。本文では、切羽の不安定現象を主として施工面から類似事例を参考として分類し、特に内空変位が大きい地山の場合には、切羽前方の塑性領域も広く、最近使用され始めている長尺フォアパイリングや長尺鏡ボルトの必要性等を解析的に、また湧水等に伴って発生する土砂流出現象を分析して対応策に概略検討を加えた。さらに崩落の規模の拡大を招くことのないように、切羽観察の要点にも触れている。

トンネル掘削において切羽を緩めると、工事の安全性はもとより、工期、工費、品質、環境面に大きく影響をあたえる。従って切羽の緩みを最小限にするための対策を適切に採用する必要があり、その際本文が些かでも参考になれば幸いである。

参考文献

- 1) 土木学会 : トンネル標準示方書 (山岳工法編)・同解説 平成8年7月
- 2) 中田雅博、西村和夫、中野清人 : 岩石ごとの地山挙動に関する研究 トンネルと地下 1998年2月
- 3) 今田 徹 : NATM20年我々は何を学んだか ハイウエイ技術 1997年12月
- 4) 竹林亜夫、大塚義之 : 膨張性地山トンネルにおける施工管理の一例 土と基礎 22-11 1974年11月
- 5) 竹林亜夫 : トンネル工学と応用地質 加藤 誠教授退官記念論文集 1997年3月
- 6) 渡辺景隆 : 地すべりと地すべり粘土 須藤俊男教授退官記念論文集 1975年
- 7) 土質工学会 : 土質工学ハンドブック 1965年
- 8) ジェオフロンテ研究会 : アンブレラ工法選定上の要点 1996年