

山岳トンネルにおける不良地山に関する 地質工学的考察

An engineering-geological study on difficult geotechnical conditions for tunnel excavation

竹林亜夫¹・滝沢文教¹・上野将司¹・奥村興平²・三上元弘²

Tuguo Takebayashi, Fuminori Takizawa, Shouji Ueno,
Kouhei Okumura, and Motohiro Mikami

¹正会員 応用地質株式会社 技術本部 (〒305-0841 茨城県つくば市御幸が丘4-3)

²正会員 応用地質株式会社 東京支社技術センター (〒305-0841 茨城県つくば市御幸が丘4-3)

E-mail:mikami-motohiro@oyonet.oyo.co.jp

In this paper, mainly literatures and some author's experiences on tunneling show how problems happen under constructing in difficult geotechnical conditions, how methods solve the problems, and how classify into groups by means of engineering-geology. The investigation shows that factors of the difficult geotechnical conditions are mainly classified into three categories that are mechanics of ground, influence of ground water and geo-chemistry. These classifications are shown related to difficult geotechnical conditions and an engineering-geological conditions respectively. Based on the relation, indicated the points to reduce risk due to difficult geotechnical conditions on mountain-tunnel.

Key Words : *difficult geotechnical conditions, fault zone, squeezing ground, landslide ground, water bearing unconsolidated ground.*

1. はじめに

山岳トンネルの施工において、断層破碎帯などの不良地山(特殊地山ともいう)に遭遇して切羽崩壊や大量湧水などの異常現象が起り、難工事となった事例は多い。こうした事例報告は、工事毎あるいは不良地山の種類毎になされているが、不良地山を総括した研究はあまりなされていない。

本報文においては、山岳トンネルが遭遇する不良地山を3つの要因に分類し、それぞれにおけるトンネル施工時の問題と対応策、地質特性について、主に文献と著者らの経験に基づいて地質的に考察を加える。そして不良地山に対応したリスク低減策について提言する。

2. 不良地山の要因別分類

各種の不良地山は要因別に以下のように整理でき

る。

① 地山の力学的要因

- ・ 膨張性などの押し出しを伴う地山(粘土質断層破碎帯を含む)
- ・ 山はねが発生する地山
- ・ 地すべり地山

② 地下水に関する要因

- ・ 大量湧水により掘削作業の能率を低下させる透水性地山
- ・ 湧水に伴い切羽崩壊する地山(含水未固結地山、断層破碎帯、褶曲じょう乱帯、頭部陥没帯を有する地すべり地山)

③ 地球化学的要因

- ・ 高い地熱、温泉などがある地山
- ・ 有害ガスなどがある地山
- ・ 酸性水、重金属などの溶出を伴う地山

これらを要因別ならびに問題となる事象別にくくと図-1のように表現できる。

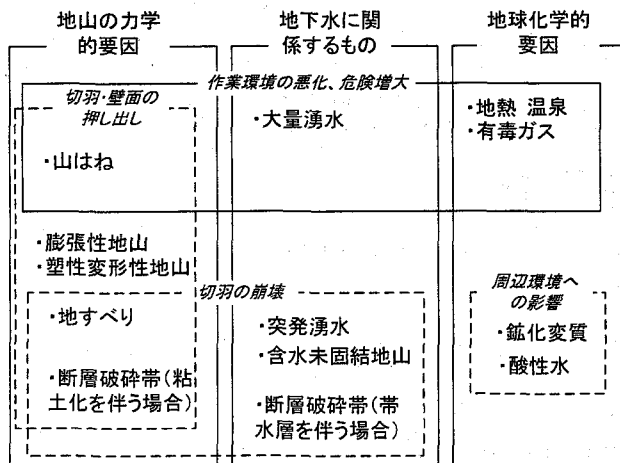


図-1 不良地山の要因別分類

地すべり地山において生じる問題の多くは、地すべりの滑動によって支保工に変状が発生するなどのケースであるが、地すべり頭部の陥没帯に帯水した地下水が切羽崩壊の原因になったケースもある。前者の場合は地盤の力学的要因による不良地山に該当し、後者の場合は地下水に起因する不良地山に該当するものと考え、本文においては分けて記述する。

同様に、断層破碎帯において粘土質の場合には膨張性地山の条件に該当することがあり、帯水部を有する場合には地下水に起因する不良地山に該当することがある。本文においては、前者は膨張性地山の項に、後者は地下水に起因する不良地山の項に分類する。

3 不良地山の分類毎の諸現象について

(1) 力学的要因による不良地山

a) 地山の強度不足に起因する膨張性地山、山はね

自然の地山内の応力は3次元状態で安定しているが、トンネル掘削により周辺地山の応力が再配分されるに伴い、支保を施す前の坑壁部では二軸応力の状態になる。このとき強度が十分ある良質地山では、切羽および坑壁の応力が弾性変形の範囲内に収まり安定する。

それに対して、土被りが大きな場合で、地圧に対して地山の強度が不足することにより、切羽および坑壁部で塑性変形を生じ、徐々に押し出しを伴うのがいわゆる膨張性地山であり、大きな変形を伴わずに脆性破壊するのが山はねであると考えられる。

膨張性の原因にはスウェリング（膨潤）とスクィーミング（押し出し性）が考えられている。周辺地山に塑性域が形成されるのは後者の場合で、わが

国の膨張性地山のほとんどがこれに該当すると考えられる。膨張性地山と評価される地山の力学的条件は地山強度比が2以下で内部摩擦角が30度以下であると考えられる¹⁾。なお、地山強度比が2以下で、内部摩擦角が30度以上の地山では変形は小さいが、塑性域が形成されることから、塑性変形地山と称する。

山はねはトンネル掘削において切羽および坑壁周辺の岩盤の一部が大きな音響を伴って突然飛び出す現象で、急激に岩盤の一部が崩壊するために切羽周辺は危険な状態になる。

山はねは岩質が均質で節理が少なく、湧水の少ない比較的大きい土被りの地山で、坑壁部の二次応力が高い場合に発生しやすいと言われている。我が国では事例が少ないが、地質は花崗岩、石英閃緑岩、黒雲母角閃石片麻岩である。

素掘り状態のトンネルの安定条件は、トンネル形状と側圧係数で決まる坑壁の応力集中係数よりも地山強度比が大きいことにある。NATMの場合、坑壁部の地山は支保の内圧効果により3軸応力状態が確保されるので、山はね現象は発破直後の切羽部に限定できる。

b) 地すべりの存在に起因する問題

地すべり土塊中やすべり面近傍において、地すべりを予知せずにトンネル掘削を行い、地すべりを誘発した事例は多い。このような事例においては、事後の調査と対策に多大な工事費と工期を費やしている。

地すべり地の地山は、すべり面を境にして基盤岩と移動層より構成されている。力学的物性値は、すべり面のせん断強度が極めて小さく残留強度程度まで低下している場合が多いのに対し、移動層や基盤岩では比較的高い値を示す場合もある。

トンネル掘削の影響による地すべりの安定性についてはすべり面の強度が問題になり、周辺地山の変位挙動に関しては移動層や基盤岩の物性値が問題になる。既往の地すべりから物性値を評価すると、すべり面のせん断強度は、表-1のように内部摩擦角が30度以下で、粘着力は無視できる程小さな値である

表-1 地質毎のすべり面のせん断強度（逆算値）⁴⁾

地質	事例数	すべり面のせん断強度	
		c, 粘着力	φ, 内部摩擦角
緑色岩	3	0 kN/m ²	13°
結晶片岩	18	0	27
中古生層	11	0	29
第三, 四紀層	18	1	10

ことがわかる²⁾。

なお、すべり面のせん断強度が残留強度程度の小さい値の場合はトンネル掘削による緩みの影響を考慮しなくても良いと思われる。

地すべり地の基盤岩の岩質は、泥岩・頁岩・粘板岩・凝灰岩などの堆積岩、結晶片岩、蛇紋岩、および火山岩類に加えて、断層破碎帯などである。基盤岩をトンネル掘削する場合、岩盤の状態が比較的良好な場合と破碎変質等で不良な場合があり、移動層にも同様のことが言える。トンネルが遭遇する地すべり地で問題となるのは、基盤岩が不良な場合と基盤の状態は良好だが移動層が破碎されている場合である。基盤岩が不良な場合において移動層の破碎の程度はトンネルへの影響に関係ないと考えられる。

トンネル掘削で問題になった地すべり移動層と基盤岩の物性値を整理すると、表-2のように内部摩擦角も概ね 30 度以下と比較的小さく、地山強度比についても概ね 1.5 以下と小さい³⁾。これらの値は膨張性地山の条件と一致しており、トンネル周辺地山に広い範囲で塑性域が形成されやすいと推察できる。

表-2 移動層と基盤岩（不良状態）の物性値³⁾

トンネル名	地すべり移動層			基盤岩		
	c	ϕ	α	c	ϕ	α
泊	28	10	0.74	58	9.5	0.5
谷稲葉	110	18	0.75	87	31	0.5
地蔵			0.1	40	7.4	0.4
春日山				50	15	0.13
足羽山				30	25	0.47
三平山				6	33	0.2
的之尾	30	26	0.2	50	26	0.3

α : 地山強度比, γ : kN/m³, c : kN/m²

(2) 地下水に起因する不良地山

a) 大量湧水で支保作業が難渋するケース

土被りが大きく地下水位が高い場合、掘削時の湧水量が多くなることがある。流域面積が大きい場合や、亀裂が多い岩盤などの透水性の地山または大空洞が存在する石灰岩地山などにおいてこのような事象が起きやすい。

経験的には、切羽での集中湧水量が約 0.5m³/min 以上、あるいはトンネル 1m 当りの湧水が 0.1m³/min 以上に達すると、切羽が自立していても吹付けコンクリートが付着しにくかったり、ロックボルトのモルタルが流出したり、火薬の装填に難渋するなど作業に支障が生じる。特に、高水圧の湧水の場合には、水抜きボーリングのロッドが水圧で押し戻さ

れるなど危険な状態に陥ることがある。

坑内湧水量は地山の透水係数と地下水位に関する。トンネルの湧水量に対応する地山の透水係数と地下水位 (H) の関係は表-3 のように試算できる⁴⁾。

表-3 トンネル湧水量と地下水頭と透水係数の関係⁴⁾

トンネル湧水量 (m ³ /min/m)		地山の透水係数 (cm/sec)		
		H=100m	H=200m	H=300m
湧水がある	0.01	1×10^{-4}	6×10^{-5}	4×10^{-5}
多量湧水	0.05	5×10^{-4}	3×10^{-4}	2×10^{-4}
大量湧水	0.1	1×10^{-3}	6×10^{-4}	4×10^{-4}

二次元浸透流解析を行った結果によると、坑内湧水量が少ないのは、地山の透水係数が 1×10^{-6} cm/sec 以下の場合で、坑内への湧水量は極僅かで、施工上の問題にはならない。それに対して、地山の透水係数が 1×10^{-5} cm/sec より大きい場合には、透水係数と坑内湧水量は比例関係にあり、地下水位の低下量および低下範囲も拡大する。

一般にシルト、粘土および割れ目の少ない岩盤の透水係数は概ね 10^{-6} cm/sec 以下で、難透水性を呈する。割れ目が多い岩盤は透水性地山となり、割れ目に地下水を賦存する帯水部にもなる。ただし割れ目が多い場合でも、粘土を介在したり、密着している場合には難透水性で地下水の賦存量は小さくなる。

b) 湧水により切羽が崩壊するケース

地下水により切羽が崩壊するケースには、含水未固結地山における流砂現象、帯水部を有する断層破碎帯における突発的な湧水、高い水圧や大量湧水などがある。また、深い地すべりの陥没帯付近をトンネル掘削し、陥没帯の未固結堆積物と地下水が原因で湧水を伴った急激な切羽崩壊が発生した例もある。

含水未固結地山においては、僅かな湧水とともに土砂が流動化して徐々に崩壊することがある。崩壊により切羽前方に空洞を生じ、土被りが浅い場合および空洞の天端が自立出来ない場合には地表陥没に至ることもある。このような含水未固結地山において切羽が崩壊する原因は、事前に地下水位を低下できないために間隙水圧が残存し、地山の強度が低下することによる。なお、地下水位を低下させた場合に、不飽和砂の状態になって切羽の自立性に問題を残すこともある。

断層破碎帯における湧水状態と切羽の崩壊形態の主なものは以下の三タイプが挙げられる⁴⁾。

- ① 粘土質地山の切羽が地下水位で押し出されつつ崩壊するタイプ。この場合、崩壊前の湧水量は少ないが、崩壊後に増加する。

- ② 破碎帯に接近した時に突発的に多量湧水とともに崩壊して土砂流出するタイプ。
- ③ 切羽が徐々に部分崩壊しつつ湧水量が増加して崩壊域が拡大するタイプ。

我が国のトンネル工事において断層破碎帯に遭遇して大量湧水を伴った切羽崩壊の事例は、いずれも地下水圧および大量湧水が原因となっている。

事前に帯水層の位置が予測できずに、突発的に崩壊するタイプは、トンネル作業の安全性から最も危険な形態である。崩壊土量は、湧水量、湧水圧、切羽断面積および帯水部の岩盤の自立性などに関係すると考えられ、特に大きい断面積の切羽が崩壊した場合には流出土量は大きくなり、危険性も増大する。

移動層の厚さが 100m におよぶ地すべり地において、土石流状に切羽崩壊した事例⁵⁾もあるが、その原因は頭部陥没帯に堆積している含水した未固結土砂が崩壊したと考えられる。

(3) 地球化学的要因による不良地山

a) 高い地熱および温泉などがある地山

トンネル施工中に坑内温度が上昇し、作業環境が悪化することがある。高熱岩盤の分布は限られるが、高熱岩盤は火山岩に限らず、花崗岩や中・古生層といった古期基盤岩の場合もある。中部地方と奥羽山地には火山活動に直接関連を有しない非火山性高温岩体—温熱地盤が点在している。

中部山岳地域の北部では全般的に地熱が高く、梓川上流域、高瀬川流域、富山県西部の黒部川流域、小川流域では高温岩体としての花崗岩体が分布しており、高温の温泉が付随する。国道 158 号線の安房トンネル付近は、古生層の硬い岩盤からなるが、一時は 70℃ 以上もの湧水があり⁶⁾、長野県側の明り区間で発生した水蒸気爆発は高温岩体からの熱水に関連した可能性がある。

火山群が存在する奥羽脊梁山地の両側には、それから離れた第三紀層地帯であっても温泉を伴って比較的高い地熱を有する地域が点在している⁷⁾。それらの一部は古いカルデラ構造に関係している。東北日本には、新生代後半の鮮新世—第四紀に形成された大小のカルデラが数十個も分布しており、それらの多くも温泉を伴い、地熱温度が高い場合が少なくない。青森県の青荷トンネル周辺や福島県南西部がその事例である。

b) 可燃性ガス・有毒ガスが存在する地山

トンネル掘削時にガス燃焼および爆発が発生すると坑内全域の作業員が被災することになるので厳重な注意が必要である。

東北日本内側から北海道西部にかけて広く分布する新第三紀層中には、メタンを主とする可燃性天然ガスの含有が知られている。特に、新潟・秋田を中心とする第三紀層地帯は古くから深層掘削して石油・天然ガスを採取してきた歴史がある。また、石炭を挟在する地層でもメタンを主成分とするガスが発生しやすい⁸⁾。

石油探査が背斜構造部を狙ってきたように、石油・天然ガスの比重は母岩よりもかなり軽いので背斜構造部や断層付近に貯留しやすい。また、深部に含油層が存在する場合、岩盤中のクラックや多孔質岩を通して上位層に移動していることもある。近年は、砂岩ばかりでなく、第三紀の火山岩層（熔岩・火山角礫岩）もその間隙の多い部分が貯留岩として注目されるようになっており⁹⁾、火山岩だからといって一概に天然ガスと無関係とは言えない。

メタンは対空気比重 0.55 で空気より軽く、トンネル天端部に滞留しやすい。その燃焼・爆発限界は大気中の濃度 5～15% で、9% 前後で爆発力が最も激しいとされている。また、無色無臭のため身体で感知し難く、高濃度だと酸欠状態となる。水溶性で地下の被圧水では溶解度を増し、坑内の常圧下で容易に遊離する。したがって、含油・含炭地域でのトンネル掘削方法と安全対策は特段の注意を要することは言うまでもない。

天然ガスはメタンのほか、少量のエタン・プロパン・一酸化炭素・硫化水素・水素など、可燃性もしくは有毒ガスを含有することもあり、時々ガス分析をするなど慎重な対応が必要である。

火山の噴気活動としての亜硫酸ガス (SO₂) や硫化水素 (H₂S) はよく知られているが、泥岩地山で長期間掘削が中断されたトンネルでは、還元反応による硫化水素が発生することがある。硫化水素は空気より重いので低所に滞留する。

c) 酸性水、重金属類の溶出が予想される地山

鉍化変質に伴う酸性水の発生および重金属類の溶出によりトンネル排水およびブリー置き場の環境管理上の問題が生じることがある。

岩石には自然の状態で重金属類（砒素、鉛、フッ素、ホウ素、水銀、カドミウム、セレン、六価クロムなど）を含有しているものがあり、山岳トンネル工事でこれらに遭遇する場合がある。自然由来の重金属類は、岩石や地熱流体などに含まれる重金属類が化学反応、溶出、移流・分散、吸着、沈殿といった物理化学的な現象によって固定・滞留したもので鉍化変質と熱水変質がある。

鉍化変質を被った岩石は、掘削などによって空気

(酸素)と水に触れると、酸化反応により生じた酸性水が岩石中に含まれる重金属を溶出せしめる懸念がある。

熱水変質作用は、地下深部において熱水が岩石と反応した結果、岩石の構成鉱物(堆積岩・火山岩にあっては岩片も)と基質に、溶解、分解、再結晶などが生じ、別の鉱物に変化したり新たな鉱物(含鉱石鉱物)が沈殿するなどして、岩石全体の化学組成、構成鉱物、組織が変化することである。

以上のように、我が国には様々な変質作用により重金属類を含有する地質が分布することから、トンネル工事においては、掘削ズリの処理・処分や工事排水に伴う環境汚染への配慮が重要である。

4. 不良地山のリスク低減策に関する考察

山岳トンネルの設計・施工において、良質地山の場合には標準設計が適用できるが、不良地山の場合には、それぞれの条件に応じた対策を適用する必要がある。したがって、不良地山が存在するトンネルの工事費および工期は良質な地山条件のトンネルに比べて大きくなる。トンネル事業にあたっては、これらの不良地山の諸条件を調査段階で把握し、設計段階で明確な対応策を採用し、施工および竣工段階では対応策を計画的に実施して将来の憂いを無くすることが重要となる。

計画・設計段階で不良地山の存在が明確な場合には、不良地山を極力避けたルートに変更することが最も有効なリスクの回避策となる。特に、地盤の力学的要因および地下水に起因する不良地山のリスクは、土被りに比例して大きくなるので、土被りの小さいルートに変更することで大部分のリスクを回避できる。

ルート変更ができない場合には、不良地山におけるトンネル施工上のリスク低減策を適切に実施する必要がある。以下に地質工学的観点から明らかとなったリスク低減策について考察する。

(1) 力学的要因による不良地山のリスク低減策

a) 膨張性地山のリスク低減策

膨張性地山の力学的条件は地山強度比が2以下でかつ内部摩擦角が30度以下であり、それらの値が小さい程剛性の大きい支保工を必要とし、掘削工法の変更が必要な場合もある。これらが後手に回ると、大きな変形に伴って支保が変状し、縫い返しが必要となることもある。したがって、地山の力学的条件

に適応した支保工や切羽前方のゆるみを抑制するための補助工法と掘削工法の組み合わせを適切に選定する必要があり、事前に地山の力学的条件をできるだけ詳細に把握することがリスク低減策となる。また、施工中の変形状況に応じて支保や補助工法、掘削工法の組み合わせを臨機応変に変更できる柔軟な体制を準備しておくことが望ましい。

b) 塑性変形地山のリスク低減策

中硬岩、軟岩および土砂地山で、土被りが大きく地山強度比が2以下で内部摩擦角が30度以上の場合に、塑性域形成に伴う塑性変形が発生する。そのリスクを低減するために、地山条件に適応した剛性の大きい支保工を計画する必要がある。

c) 山はねのリスク低減策

山はねは、初期地圧が大きく割れ目の少ない硬岩地山において、坑壁部の二次応力が集中して脆性破壊をする現象である。山はねの発生を調査段階で予測するのは困難であるが、初期応力測定の実例によると鉛直応力に対して水平応力が数倍の大きさを有していることが稀にあり、初期応力の状態を測定することがリスク低減策となることがある。また、施工時のリスク低減策としては円形に近いトンネル断面形状を採用するとともに、切羽付近において早期に3軸応力状態を発揮する支保を設置することが効果的である。国道140号の雁坂トンネルや広島県の西風トンネルでは、山はね対策として、鋼管膨張型ボルトを斜めロックボルトとして打設し、スチールファイバーを混入した吹付けコンクリートとの組み合わせ支保を実施している。

また、山はねの前兆現象として山鳴り現象が発生する場合があります。山鳴り現象を微小なレベルで把握できるAEセンサー測定を行い工事の安全性向上に努めている事例もある¹⁰⁾。

d) 地すべり地でのリスク低減策

地すべりの存在を予知できずにトンネル施工を行うと、地すべりを誘発して多大な工費や工期を費やす。したがって、事前の調査、設計段階で地すべりを予知することが重要であり、地すべりに詳しい地質技術者によって地すべりの有無を確認することがリスク低減策となる。

トンネルの掘削影響範囲において、地すべりの変位が認められる場合には地すべり安定対策を最優先する必要がある。対策方法は地すべり規模や抑止力の大きさによって左右されるので、地すべりの範囲や大きさ、すべり面の物性値、地下水位などできるだけ多くの情報を調査した上で、トンネルによる影響を予測することが重要である。

なお、トンネル掘削により地下水位が低下するのに伴って、すべり面の間隙水圧が低下し、地すべりの安定性が増すことがあるのでトンネル内の湧水は積極的に排水処理すべきである。

移動層や破碎された基盤岩でのトンネル掘削においては、周辺地山が緩みやすいので、地すべり安定対策工に加えて、トンネル支保の剛性増加および切羽面の自立性確保のための補助工法を検討する必要がある。また、トンネルがすべり面を貫く部分では過大な応力が作用したり湧水が続いたりする場合が多いので、トンネル覆工の剛性を高める等の対策と適切な排水処理工を併せて実施すべきである。

(2) 地下水に関するリスク低減策

a) 大量湧水・突発的湧水に対する対策

トンネルの掘削において地下水が問題となる場合のリスク低減策は、基本的には事前に地下水位を低下させることである。土被りが浅い都市トンネルの場合には事前に地表から地下水位を低下させるが、山岳トンネルでは土被りが大きいために、切羽より長尺探りボーリングを行い、帯水部の把握と地下水位の低下をはかる方法が有効である。

水位低下工法の選定においては、地山の透水性、水頭、粒度分布などの情報から最も効果的な工法を選定する必要がある。湧水量が多い場合や地下水位が高い場合には、水位低下に必要な時間を短縮するために、複数の水抜きボーリングや水抜き坑を施工して地下水位を低下させる方法がとられる。

なお、利水などの理由で地下水位を低下できない場合や、海底トンネルなどにおいては、トンネル周辺地山に地山改良工法などで難透水ゾーンを形成する場合もあるが、工事費および工期が増大する。

b) 地すべり頭部陥没帯の地下水対策

大移動した地すべりにおいて地すべり頭部に陥没帯が形成されている場合、陥没帯には多くの引っ張り亀裂や空隙が発達している。この陥没帯にはルーズな未固結物が堆積し、豊富な地下水を貯留していることがある。よって陥没帯は避けることが望ましいが、やむを得ず陥没帯付近をトンネル掘削する場合は切羽到達前に排水工法で地下水位を低下する方法および注入固化する方法などの補助工法を組み合わせる方法がある。対策を行う上で事前に帯水区間を精度よく把握することが重要である。

c) 帯水した断層破碎帯の対策

断層破碎帯の存在を事前に把握するには地表地質踏査が有効である。地質踏査の精度は高いほど良いのは言うまでもないが、岩石・地層の露出具合もあ

り、縮尺 2500～5000 分の 1 の程度は必須である。トンネルは、峠や尾根といった岩盤の露出状況が比較的不良な場所を通過するため、片側 1～1.5km と広めに踏査をしないと断層などを見落とすことがある。破碎帯は岩盤の脆弱部であるが故に崩壊しやすく、崖錐などで埋まったり植生で隠れている場合も多い。直接発見できなくとも、精度の高い地質図を作成すれば、地層のくい違いやずれ、地質構造のギャップなどの存在を見出すことによって断層を予測（推定断層）できる。それを地表からのボーリングや、施工時には先進ボーリングなどによって確認すればよい。

以上のように、地質条件と地質構造を把握することが、トンネル湧水位置の予想や、解析する際の地山モデル作成においても、さらに、対策工法を設計する場合などにおいても重要である。

(3) 地球化学的要因の不良地山のリスク低減策

トンネル事業にあたっては、地球化学的要因による不良地山を調査段階で把握し、設計段階で明確な対応策を計画する必要がある。事前調査には地質踏査に併せて地表からのボーリング調査が有効である。調査により不良地山の存在が判明した場合には、ルート変更を行うことがリスク回避策であるが、それができない場合には、トンネル工事におけるリスク低減策を行う必要がある。

a) 地熱・温泉がある地山のリスク低減策

高い地熱および温泉などがある地山にトンネル工事を行うに際し、労働安全衛生法および規則に準拠し、作業員の健康被害を防ぐことが重要であり、坑内温度を下げるための十分な換気を計画する必要がある。また、高熱に適應した支保材料の選定も必要になることがあり、十分な事前対策が求められる。

地熱地域の事前調査には地表からのボーリング調査が有効であるとともに、できるだけ調査坑を施工することが望ましい。安房トンネルにおいては、事前調査段階で、高温対応で注入材やセメント材など施工材料に関する様々なテストが試みられている。

b) 可燃性ガス・有害ガスを含む地山のリスク低減策

仙台層群・大阪層群・古琵琶湖層群など鮮新～更新統の若い地層の一部には亜炭層が挟在している場合がある。こうした地層の掘削時には、旧坑道（空洞）の分布状況の把握やメタンガスの存否を事前にチェックしておく必要がある。古い資料であるが、多くの炭田地域では「炭田地質図」（旧地質調査所・北海道地質研究所発行）が公刊されており、石炭層の賦存状況が示されているので、計画段階での参考

油田地域においてトンネルを施工する場合は、予め石油・天然ガスの含油層準を既存資料などから調べると共に、地質構造を精細にチェックしておくべきである。含油第三紀層及び石炭層の分布する地域では、先進ボーリングによって地山中のガス含有状況の掌握に努めるほか、掘削中は坑内のガス検知管理と換気装置の配備を欠かせない。貯留濃集部が判明した場合は、地山中のガスをボーリング孔で抜き、坑内気流に混ぜないで直接坑外、または安全な場所まで誘導放出することが必要である。

大気や雨水に曝される岩盤や掘削ズリなどの岩石中に基準を超える重金属類を含む場合、周辺環境や生態系、人の健康などに影響を与える可能性がある。重金属類により汚染した土壌に伴う健康リスクには、含有量基準で判定される直接摂取リスクと溶出量基準で判定される汚染地下水摂取リスクがある。有害物を含有したトンネル排水に関しては「土壌・地下

鉱化変質に伴う酸性水の発生および重金属類の溶出などによりトンネル排水およびズリ処理場の環境管理上の問題が生じるおそれのある地山では、排水およびズリの有害物の含有試験を実施し、有害物に対応した排水処理およびズリ処理方法を計画的に実施する必要がある。

酸性の変質帯には硫黄や黄鉄鉱を含むことが多いので、変質帯の指標として、簡便な硫黄含有量の化学分析を行うのも一つの方法である。また、八甲田トンネル¹¹⁾で、その有効性が紹介されているように、火山岩類(花崗岩類も)は一般に堆積岩類に比べて、磁性が高いのに、変質を被ると磁性が極端に弱くなる。この性質に着目して携帯用磁率計を用いて、岩石の帯磁率の分布状況を調べることによって、変質帯の範囲を概略的に把握できる可能性がある。

岩 盤 状 態				不良地山の種類									
地 山 区 分	岩 石 の 硬 軟	岩 石 名	節 理・割れ 目の多少 空洞の有無	地山の力学的要因				地下水の影響			地球化学的要因		
				膨 張 性 地 山	塑 性 変 形	山 は ね	地 す べ り	湧水と共に崩壊 地すべり	結 含 水 未 固 帯 断 層 破 碎	多 量 湧 水	地 熱 ・ 温 泉	有 害 ガ ス	変 質 熱 水 ・ 鉍 化
φ	硬質岩	花崗岩、花崗閃緑岩、片麻岩、斑れい岩、	割れ目少			△					△		
			割れ目多						△	△			
		塊状蛇紋岩、チャート、砂岩	割れ目少			△							△
			割れ目多						△				△
		石灰岩	空洞無し			△							△
			空洞有り						○				△
	中硬岩・軟岩	安山岩、玄武岩、流紋岩	割れ目少		△	△					△		△
			割れ目多		△		△			△	△	△	△
		緑色片岩、砂質片岩	割れ目少		△								
			割れ目多		△		○			△			
		礫岩、砂岩（第三紀）	割れ目少		△					△	△	△	△
			割れ目多		△					△	△	△	△
砂質凝灰岩（高強度）		割れ目少		△						△		△	
		凝灰角礫岩（高強度）	割れ目多		△		△			△	△	△	△
土砂	礫層、砂層、風化砂質土			△		△	○		△		△		
	断層破碎帯（角礫質）			△		△	△	○	○		△	△	
	熱水・鉍化変質砂質土			△		△	△	△	△	△	△	○	
c	中硬岩	粘板岩、頁岩、泥質片岩	割れ目少		△	△							△
			割れ目多		△		○			△			△
	軟質岩	泥岩（第三紀）、 凝灰岩類（低強度）	割れ目少	△	△		△			△		△	
			割れ目多	○			○			△	△	△	△
		葉片状蛇紋岩、粘土質蛇紋岩		○			○				△	△	
	土砂	断層破碎帯（粘土）		○			○	△	△		△	△	△
		更新世粘性土、風化粘性土		○			○	△			△		
		熱水・鉍化変質粘性土		○			○	△	△		△	△	○

- 125 -

5. 不良地山に関する地質工学的考察

岩盤の強度特性を考慮した岩種表¹⁾に基づいて、これまでに考察した各種の不良地山の岩石と岩盤状態を表-4の一覧表にまとめ、ここに提案する。表-4により、それぞれの岩石において前述の土被り等の地山条件が揃った場合に不良地山になることが示されている。

6. まとめ

本文においては、トンネル工事においてリスクの大きい不良地山について、地質工学的に考察し、次の結論を得た。

- ① 各種不良地山を地盤の力学的要因、地下水の影響による場合および地球化学的要因の三つに分類した。
- ② 地盤の力学的要因には、膨張性地山、塑性変形性地山、山はねが予想される地山および地すべり地山が含まれる。
- ③ 地下水の影響による不良地山は、湧水により掘削能率が低下する場合と、切羽崩壊が問題となる場合に区分できる。切羽崩壊が問題となるのは、含水未固結地山、断層破碎帯および頭部陥没帯を有する地すべり地山などである。
- ④ 地球化学的要因による不良地山には、地熱、温泉、有害ガスおよび鉱化変質岩の地山が含まれる。
- ⑤ 山岳トンネルにおける各種の不良地山に関係する岩種および岩盤状態を一覧表に示し、提案した。
- ⑥ 調査・設計段階において不良地山の存在が明らかとなった場合には浅い土被りのルートに変更することが有効なリスク回避策となることがある。それができない場合の各不良地山のリスク低減策の要点を明示した。

参考文献

- 1) 竹林亜夫, 滝沢文教 (2002) : トンネル掘削時の坑内変位に関する地質工学的研究, 応用地質技術年報, No.22, pp.41~63.
- 2) 上野将司 (2002) : 孔内傾斜計を主とした地すべり計測結果の検討と地すべりの予知に関する研究, 愛媛大学博士論文, pp.119~132.
- 3) 竹林亜夫, 上野将司 (2004) : 地すべり地におけるトンネル掘削時の諸問題に関する地質工学的考察, 応用地質技術年報, No.24, pp.39~67.
- 4) 竹林亜夫, 滝沢文教, 木村正樹 (2003) : 湧水によるトンネル切羽の不安定化に関する地質工学的研究, 応用地質技術年報, No.23, pp.19~54.
- 5) 藤田芳邦, 谷井敬春, 高橋浩, 菊地裕一 (2003) : 土かぶり 130m の地表面陥没に至った大崩落, 上信越自動車道日暮山トンネル東工事, トンネルと地下, 第 34 巻 1 号, pp.7~14.
- 6) 松下敏郎 (1992) : 高熱帯と高水圧低速度帯を克服して調査坑が貫通—一般国道 158 号安房トンネル. トンネルと地下, v. 23, no.3, p. 191-198.
- 7) 阪口圭一・高橋正明・玉生志郎・野田徹郎 (2000) : 東北・九州地熱資源図—I. 東北. 工業技術院地質調査所
- 8) 倉 富彦 (1991) : 夕張炭田地帯の可燃性ガスと戦う. トンネルと地下, v. 22, no. 6, p. 443-450.
- 9) 島津光夫 (1991) : グリーンタフの岩石学. 共立出版. 172p.
- 10) 望月常好, 穂刈利夫, 斉藤義信, 桑田俊男 (1990) : 土かぶり 200m で山はね現象に遭遇, トンネルと地下, 第 21 巻 9 号, pp. 27~36.
- 11) 服部修一, 太田岳洋, 木谷日出男 (2003) : 酸性水発生に関わる掘削残土の応用地質学的検討, 応用地質, 第 43 巻第 6 号, pp.359~371.