

# 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

竹林 亜夫・滝沢 文教・上野 将司・奥村 興平

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

Tsuguo Takebayashi, Fuminori Takizawa, Shoji Ueno and Kohei Okumura

### Abstract

There have occurred many unusual cases with collapses or plentiful water inflow at tunneling face in difficult geotechnical conditions that are fault zone and squeezing ground etc., under constructing mountain-tunnel in Japan. Some of them were reported individually on a difficult geotechnical condition for tunnel excavation. However, it has been yet studied partially on difficult geotechnical conditions for tunnel excavation.

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 classification 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

**Keywords:** fault zone, squeezing ground, landslide ground, water bearing unconsolidated ground, rock bursts, face collapse, plentiful water inflows.

### (要 旨)

山岳トンネルにおいて断層破碎帯および膨張性地山などの不良地山に遭遇すると、切羽崩壊および多量湧水などの異常現象が発生して難工事に陥った事例が多い。不良地山のトンネル事例報告は工事ごとにおこなわれていたり、不良地山の種類ごとに考察されているが、未だに部分的な研究がほとんどである。

本論文は、不良地山においてトンネル掘削時に発生する問題と対応策および不良地山の地質特性について、主に文献と著者達の経験に基づいて地質工学的に考察したものである。その結果、不良地山には地盤の力学的要因と地下水の影響による要因および地球化学的要因との三つに分類されることが判明した。この分類により、それぞれの不良地山と各種の地質状態との関係が明らかとなり、山岳トンネルにおける不良地山に対応したリスク低減対策についての要点を示した。

**キーワード:** 断層破碎帯, 膨張性地山, 地すべり地山, 含水未固結地山, 山はね, 切羽崩壊, 多量湧水。

### 1. はじめに

山岳トンネルは線状構造物であるために、掘削時に遭遇する岩質、地下水状態および土被りなどの地山条件は縦断方向に変化している。その地山条件はトンネルの設計・施工において、一般的な良質地山と不良地山に区分される。一般的な良質地山では、標準設計手法を適用して経済的に施工ができ、最近の施工技術の発展により大部分の地山条件がこれに該当するようになった。それに

対して、断層破碎帯、膨張性地山、地すべりなどの不良地山の区間では、標準的な設計・施工方法を採用した場合に、しばしば切羽の崩壊および支保の変状などの問題が発生するために、施工法の変更および補助工法の採用を余儀なくされ、その結果、工事工程および工事費に影響を与えるリスクが伴う。

したがって、不良地山の存在が予想される場合には、事前の調査段階で追加調査を行い不良地山の状態を把握して対策を準備することが、事業を円滑に実施する要点

でもある。また、不良地山には突発湧水およびガス噴出など工事の安全性に関係する問題および酸性水などの環境に関係する問題も含まれて工学的に幅広い分野の対応が必要になる。

さらに、公共工事のコスト縮減は社会的要請となっていて、山岳トンネルにおいては、不良地山に対応する経済的な設計・施工方法の確立が緊急の課題となっている。

本論文は、このように幅広い分野に関係する不良地山の条件について、我が国で施工された工事事例に基づいて地質工学的(岩盤力学, 地盤工学, 地質学, 地球化学など)に考察し、いくつかの所見が得られたので報告する。

## 2. 既往の研究

土木学会の山岳トンネル標準示方書<sup>1)</sup>および日本道路協会の道路トンネル技術基準<sup>2)</sup>において、特殊地山または不良地山(以下、本文では不良地山と称す)には次のような種類が挙げられている。

- ① 地すべりなどの移動性地山
- ② 膨張性地山
- ③ 山はねが予想される地山
- ④ 高い水圧や大量湧水の発生が予想される地山
- ⑤ 含水未固結地山
- ⑥ 断層破碎帯、褶曲じょう乱帯
- ⑦ 高い地熱, 温泉, 有害ガス等がある地山
- ⑧ 鉱化変質, 酸性水等の発生が予想される地山

これら不良地山に関する研究は、主に個別のトンネル工事事例に基づいて行われてきた。不良地山を幅広く研究した高橋彦治は「湧水と地圧」および「膨張性土圧と地すべり」などを発表し、特にトンネル湧水量の推定式は現在でも使用されている。著者達は上記の項目のうち、本誌の22号<sup>3)</sup>で②, ⑥について、23号<sup>4)</sup>で④, ⑤, ⑥について、24号<sup>5)</sup>で①について研究報告している。

以下に、不良地山の種類ごとにそれぞれの既往の研究について述べる。

### 2. 1 地すべり地山に関する研究

高橋彦治<sup>6)</sup>は我が国で施工された地すべり地のトンネル掘削において誘発された地すべり現象について次のような項目に分けて事例研究をしている。

- ① 地すべり地内に掘られたトンネル
- ② 地すべり面下で地すべりの影響を避けたトンネル
- ③ 掘削時に地すべり挙動を誘発したトンネル
- ④ 近接工事など外部的誘因の影響を受けるトンネル
- ⑤ まとめとして地質調査に際してのアドバイス

中村浩之<sup>7)</sup>はトンネルが地すべり地内を通過する場合に、トンネル掘削により地すべりを誘発する危険性があるため、事前に地すべり対策工を実施することが大切であると指摘している。また、トンネルが地すべり地外を近接して通過する場合に、掘削による緩み現象により地

すべりを誘発することが考えられるので、地山の緩みを最小限にするトンネル施工技術の努力が必要であると述べている。

### 2. 2 膨張性地山に関する研究

膨張性地山に関する既往の研究は、その時代の施工法と観察・計測技術そして土質試験技術に密接に関係していて、次のような傾向が考えられる<sup>8)</sup>。

① 矢板工法を使用した時代では、鋼製支保工の軸力および地圧の計測が実施されたが計測断面は少なく、かつ土質試験結果も少ない中で、膨張性地圧およびその原因に関する研究が行われた。その結果、膨張性を呈する岩種と地質状態が明らかとなりつつあった。

② 難渋したトンネルにおいて施工管理に用いた、膨張性に関係する地山物性項目が、トンネル標準示方書に記されている。それらの指標はそれぞれの現場の地山条件と数少ない土質試験結果に拘束されているために他のトンネルに普及できずに、参考資料として用いられているのが現実である。

③ NATMに移行する中で、内空変位と天端沈下計測および切羽地質観察の実施例をまとめた研究が行われ、変位量と地山物性値との相関も明らかになりつつある。その結果、土質試験資料が少ないためにバラツキはあるものの、地質状態の資料に基づいて支保の変状および変位の程度を予測できつつある。

### 2. 3 山はねに関する研究

我が国の山岳トンネルで、山はね現象が発生した工事例は僅かである。谷川岳を貫く上越線や新幹線の清水トンネル、関越自動車道の関越トンネルでは土被り厚さが約750mより深い場合の節理の少ない石英閃緑岩において山はねが発生した報告がある<sup>8), 9), 10), 11)</sup>。それに関して昔より岩盤工学的な検証実験および各種解析的研究がある<sup>12)</sup>。

近年、花崗閃緑岩で土被りが約200mの雁坂トンネルの事例が報告<sup>13)</sup>されて、地山の初期応力測定を実施した結果、水平応力が卓越していることを確認している。その工事において安全性を確保するために各種の補助工法およびA Eセンサーによる予知体制が採用されて報告されている。

一方、海外では土被りの大きい鉱山での数多くの事例を分析して山はねの分類が行なわれて、それぞれに対する対策方法が提案されている<sup>14)</sup>。

### 2. 4 高い水圧や大量湧水の発生事例の研究

掘削時に切羽で遭遇する湧水の量は地盤の透水係数と地下水圧および帯水部の貯留量に関係している。湧水量

に関する解析については、これまで簡易な水理公式から電子計算機での解析手法など、数多くの解析方法が提案されている。しかし、山岳トンネルにおいては帯水層の分布状態、地山の透水係数とその分布状況および地下水压などの調査を十分に行えないために、解析結果の精度は充分とは云えない。このことから、トンネル工事における現実の問題は湧水量を正確に予測することではなく、集中湧水の位置を地質工学的的手法などで予測することと考えられている<sup>15)</sup>。

湧水の位置を予測する地質工学的方法は、昔より地質踏査、弾性波探査、ボーリング調査および電気探査（最近では比抵抗映像法が主に用いられる）などを組み合わせて実施されるとともに、類似地形・地質条件のトンネル施工事例を参考にして検討される。

近年、調査段階では坑口付近において水平ボーリングにより地質と湧水量を調査する方法が定着しつつある。施工段階では湧水が予測される位置の手前までトンネル掘削を行って、掘削を一時停止して先進水平ボーリングなどを施工することにより切羽前方の地質と湧水量を把握しつつ地下水位を低下する現実的で安全な方法が普及しつつある。

## 2. 5 含水未固結地山に関する研究

含水未固結地山に関する研究は、トンネル工事報告において工事中に発生した切羽崩壊の状況および補助工法を採用した結果に関するものがほとんどである。また、施工時に各種の土質物性試験を実施し、地盤工学に基づいて土砂の流動化に関する研究<sup>16)</sup>が行われトンネル標準示方書などに地山の流動化を示す指標がまとめられているが、調査段階で物性値などを把握でき難いために実用化には至っていない。

したがって、含水未固結地山のトンネル工事に際しては、類似した地山条件で施工された事例報告が参考資料として主に使用されている。

## 2. 6 断層破碎帯、褶曲じょう乱帯に関する研究

断層破碎帯、褶曲じょう乱帯に関する報告は、主に工事ごとに行われ、中央高速自動車道の恵那山トンネル<sup>17)</sup>では切羽崩壊の形態をつぎの3つに区分している。

- ① 粘土質破碎帯の切羽が押し出されつつ崩壊する。
- ② 破碎帯に接近した時に突発的大量湧水に伴い土砂流出が発生し崩壊するタイプ。
- 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。

このように断層破碎帯の土質・岩盤状態と背後の地下水状態との関係でトンネル掘削時に様々な湧水を伴う崩壊現象が発生していて、個別の工事ごとに報告されている。

## 2. 7 高熱、温泉、有害ガスなどがある地山の研究

高い地熱、温泉および有害ガスなどがある地山のトンネル工事は、坑内作業環境が著しく低下するだけでなく、火傷および坑内ガス爆発などの労働災害が発生する<sup>18)</sup>こともあり、それぞれに特徴があることから主に個別の工事ごとに報告されている。

温泉地域に近接したトンネルは、調査段階で高い地熱および温泉湧出の可能性が判明するために、施工時には水平ボーリングなどの調査が実施され、その時代の最新技術を駆使した坑内作業環境対策などについて報告されている。

有害ガスにはメタンガスなどの可燃性ガスと硫化水素ガスやアンモニアガスなどの呼吸困難に陥る有害なガスに分けられる。可燃性ガスにより坑内爆発が発生したトンネルでは、爆発の衝撃および発生ガスの吸引により坑内全域で深刻な人的被害の状況と対策について報告されている。

近年、トンネル・セーフティ・アセスメントに基づいて施工計画時に可燃性ガスの噴出の可能性のある地山を事前に評価し、危険度のランク付け、施工時の調査方法と調査結果に対応した安全対策などが工事ごとに明確にされ、その工事結果について報告されている。しかし、有害ガスが賦存する地質条件について、今後に残されている研究課題は少なくない。

## 2. 8 鉍化変質帯、酸性水等の地山に関する研究

鉍化変質帯を主とする重金属類の溶出および酸性水の発生などの環境問題については、近年、社会的に関心を集めていることから、施工時に実施した対応策が個別の事例ごとに報告されている。

その中で、金属鉍山が稼動していた地域や黄鉄鉍を含んだ鉍化変質帯が分布する地域では、地中内にある場合には還元状態で安定しているが、トンネル掘削に伴い重金属類が酸素と水に触れて酸化反応を生じ、酸性水などの環境問題が発生することがある。これらの地域では、他の硫化鉍物を伴う場合もあり、酸性水によって溶出することもあることから施工時に実施した環境対策事例が報告されている。

また、重金属類を含むトンネルの掘削ズリが、雨水などの浸透水により化学反応をさせないように遮断した対応事例として八甲田トンネル<sup>19)</sup>などの管理方式が報告されている。

## 3. 不良地山における諸問題と不良地山の分類

### 3. 1 不良地山における諸問題と原因に関する考察

不良地山の種類ごとに、トンネル施工時に発生した諸問題の代表的な事例およびその原因について考察する。

### 3. 1. 1 地すべり地山の諸問題と原因

トンネル工事において地すべりに遭遇するのは坑口部および途中の土被りの比較的浅い区間が多い。

地すべりを予知せずにトンネル工事を行い、地すべりを誘発した事例は多く、事故後の調査と対策に多大な工事費と工期を費やしている。なかには、地すべり崩壊のために道路・鉄道線形を変更した事例もある<sup>9)</sup>。これらはトンネル掘削による周辺地山の緩みが地すべり土塊の安定に影響を及ぼしたことによると考えられる。

また、トンネル支保工が変状する事例も多く、その原因は地すべり地の基盤岩が多くの場合に破碎変質している、膨張性地山と地山条件が類似している<sup>5)</sup>。

さらに、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<sup>20)</sup>も発生しているが、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. 1. 2 膨張性地山の諸問題と原因

山岳トンネル工事において膨張性地山に遭遇すると、切羽の自立性が不足して崩壊が発生し掘削に難渋するとともに、支保工には強大な土圧が作用して著しく変形するなど難工事に陥ることが多い。特に、木製支保工および鋼製支保工を使用した矢板工法の場合には、支保の剛性が不足して変状破壊し、縫い返し掘削を余儀なくされるなど、試行錯誤に陥り大幅に工期が延びて、その結果として工事費が大きく嵩むことがあった。

近年普及したNATMは地山の力学的条件に適合した支保を施工できることから支保の変状破壊は少なくなり、切羽の自立性についても各種の補助工法を採用することにより、崩壊を防止できて工事の安全性と経済性が向上しつつある。施工時に実施されているNATMの計測管理の結果、吹付けコンクリートにひび割れが発生するなどの支保の変状が始まる時の内空変位量は50mm以上、天端沈下量は40mm以上と考えられる<sup>23)</sup>。

支保工の変状が発生する膨張性地山の力学的条件は、明らかになりつつある<sup>24)</sup>。

### 3. 1. 3 山はね地山の諸問題と原因

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、時には一昼夜以上にわたり断続的に発生することもある。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り作業の安全性や使用機械類の破損などの深刻な問題が発生することから、山はねの発生原因について昔より研究されている<sup>12)</sup>。

山はねは岩質が均質で節理が少なく、湧水も少なく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

合に発生し易いと言われている。また、前兆現象として山鳴りがある場合もあり、最近では微小振動波を測るAEセンサーを設置して予知計測を行っている。

### 3. 1. 4 高水圧・大量湧水の地山の諸問題と原因

湧水性地山に遭遇すると、切羽が湧水と共に崩壊することがあり、地下水圧が大きく、破碎帯および地山の割れ目が多いほど崩壊規模は大きくなる。切羽崩壊が発生すると、復旧工事に多大な工費と工期を必要とする。

また、切羽崩壊を伴わない多量湧水の場合には、吹付けコンクリート作業において硬化前にコンクリートが流出したり、火薬の装填に難渋したりして、湧水量が多いほど掘削作業の能率が低下する。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り注意を要す。

このような切羽湧水に伴った諸問題は前方地山の地下水が原因であり、大量湧水が発生する地山は土被りの大きい断層破碎帯や割れ目の発達した透水性地山および大空洞が存在する石灰岩地山などである。

### 3. 1. 5 含水未固結地山の諸問題と原因

含水未固結地山において、僅かな湧水と共に土砂が流動化して徐々に崩壊する。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。また、泥岩と含水未固結層である砂層、砂礫層などが互層していて、泥岩の被り厚が薄くなると湧水に伴って土砂が流出して切羽の崩壊に至ることがある<sup>4)</sup>。

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地下水位が低下出来ないために間隙水圧が残存して、地山の強度が低下することによる。

なお、含水未固結地山の地下水位を事前に低下した場合に土砂流出は防止できるが、不飽和砂の状態になったために切羽の自立性に問題を残すことがある。

### 3. 1. 6 断層破碎帯の諸問題と原因

トンネル掘削において帯水性の断層破碎帯に遭遇した時に所謂遮水層の被り厚さが薄くなると、湧水を伴った切羽崩壊が発生することがある。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<sup>4)</sup>。

- ① 粘土質地山の切羽が地下水圧で押し出されつつ崩壊する。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と復旧対策を表一1に

表-1 土砂崩壊を伴った断層破砕帯などの多量湧水事例<sup>4)</sup>  
 Table-1 Tunnels with plentiful inflow in fracture zone etc.

崩壊タイプ	地質		トンネル名	土被り厚さ m	最大湧水量 m <sup>3</sup> /min	湧水圧 N/mm <sup>2</sup>	崩壊土量 m <sup>3</sup>	備考
	基盤岩	破砕帯などの状態						
①	花崗岩	幅 50m、粘土押し出し	六甲 T (鶴甲工区)	約 180	—*	1.5	約 100	毎分 10cm で計 7.5m 粘土押し出し
②	花崗岩	幅 10m、粘土、マサ土	六甲 T (芦屋工区)	約 300	3	2.0	約 300	両側に枝状水抜き坑、復旧 10 ヶ月
②	花崗岩	幅 50m、粘土挟み	六甲 T (鶴甲工区)	約 180	4	2.3	約 100	同上、復旧 6 ヶ月
②	花崗岩	幅 30m、土砂状	恵那山 T (富士見台)	約 1000	約 50	—	約 300	片側水抜き・迂回坑、
②	花崗ひん岩	幅 15m、粘土質頁岩	蘇武 T	約 300	約 8	—	約 600	排水ボーリングと注入、約 5 ヶ月
②	花崗岩	幅 25m、粘土、マサ土	六日市 T	約 150	約 40	0.75	約 1300	両側に枝状水抜き坑、復旧 7 ヶ月
②	緑色片岩	幅 30m、粘土質割れ目	福岡 T (東工区)	約 200	約 20	2.0	約 500	片側に水抜き・迂回坑、復旧 4 ヶ月
②	花崗斑岩	幅 30m、粘土、マサ土	日足 T	約 300	3.2	—	約 2600	片側水抜き・迂回坑、復旧 6 ヶ月
②	濃飛流紋岩	幅 35m、粘土帯	中呂発電所放水水路	約 430	5.4	1.6	約 440	両側に水抜き坑、約 3 ヶ月で突破
②	火山礫凝灰岩	幅 20m、割れ目多い	青函 T (吉岡作業坑)	水面下 300	約 70	2.0	約 1000	片側に水抜き・迂回坑、復旧 3 ヶ月
③	泥岩	地すべり域崖錐帯	日暮山 T (II 期)	約 130	約 20	—	約 3000	地表面陥没、復旧 10 ヶ月
③	花崗岩	幅 95m、粘土はさみ	関電 T (黒部川)	約 560	約 40	4.2	約 100	両側に水抜き坑、7 ヶ月で突破
③	花崗岩	幅 25m、泥状マサ土	恵那山 T (神坂第 5)	約 400	約 10	4.0	約 500	片側に水抜き・迂回坑
③	花崗岩	幅 100m、粘土帯、礫	盤滝 T	約 270	2.7	1.5	約 700	ウレタン式フォアパイリング

示す<sup>4)</sup>。表一には湧水量の状態と崩壊状態のタイプを上記の番号で示している。これらの崩壊はいずれも地下水圧および湧水量が原因となっている。

なお、破碎帯全体が粘土質地山の場合には前述の膨張性地山と同様に湧水を伴わない切羽崩壊および支保工の変形が発生することがある<sup>17)</sup>

### 3. 1. 7 地熱、温泉、有害ガスなどがある地山

トンネル施工時に高い地熱および温泉水に遭遇し、高湿状態で坑内温度が30度以上に達すると、作業員に熱中症などの労働衛生問題が発生する。さらに、封圧されていた熱水および蒸気が噴出する場合には、火傷および掘削時に使用する火薬類の自然爆発などの労働安全上の深刻な問題が生じる。

トンネル施工時に遭遇する有害ガスにはメタンガスなどの可燃性ガスと一酸化炭素、硫化水素、亜硫酸ガス、酸化窒素などのガスがある。有害ガスが噴出する場合には、坑内ではガス爆発および酸素欠乏が発生し坑内全域の作業員に被害を及ぼす重大災害に陥ることがあるので注意を要する。

高い地熱および温度の高い温泉は主に火山岩分布地帯および花崗岩体の一部に高温岩体として、有害ガスは石炭、石油産地付近および泥質堆積層の地山などに地球化学的条件の下で存在している。

### 3. 1. 8 鉍化変質帯、酸性水が予想される地山

鉍化変質帯では掘削に伴って酸素と水に反応して酸性水の発生および重金属類が溶出し、トンネル排水およびズリ処理場が環境上の社会問題になることがある。特に、重金属類を含んだ掘削ズリを無管理状態で複数の箇所処理した場合には広範囲にわたる社会問題になることも考えられる。これらの鉍化変質帯は地球化学的条件の下で存在していることから、調査段階で確実に把握するとともに施工段階において適切な処置を行い、さらに工事完成後の処置についても配慮する必要がある<sup>19)</sup>。

## 3. 2 不良地山の分類に関する考察

以上のように、山岳トンネルの施工時に各種の不良地山において発生する諸問題とその発生原因について考察した。その結果、各種の不良地山を要因別に以下のように整理できる。

- ① 地盤の力学的要因による不良地山
  - ・ 膨張性地山（粘土質断層破碎帯を含む）
  - ・ 山はねが予想される地山
  - ・ 地すべり地山
- ② 地下水の影響による不良地山
  - ・ 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の発生が予想される地山

（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 地球化学的的要因による不良地山
  - ・ 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、重金属などの溶出が予想される地山
 上記の分類について以下に記述する。

### 3. 2. 1 地盤の力学的要因による不良地山

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。一般の良質地山では、切羽および坑壁の応力が弾性範囲内に収まっていて安定している。

それに対して、切羽および坑壁部で塑性変形を呈するのが膨張性地山で、脆性破壊する場合は山はねと考えられる。このように、膨張性地山と山はねはトンネル掘削に起因した地盤の力学的要因による不良地山である。

また、地すべり地山におけるトンネル掘削において、地すべり挙動を誘発して支保工に変状が発生する場合と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る場合がある。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の影響による不良地山に該当し、本文において分けて記述する。

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の影響による不良地山に該当することがある。したがって、本文において粘土質断層破碎帯は膨張性地山の項に、帯水部を有する断層破碎帯については地下水の影響による不良地山の項に区分する。

### 3. 2. 2 地下水の影響による不良地山

山岳トンネルは地山の地下水位を低下させることにより、掘削時には切羽の自立性をはかり経済的で安全に工事を遂行するとともに、完成時にはトンネル構造である覆工コンクリートに地下水圧を作用させない経済的な構造物を構築することを前提としている。地下水位を低下する時に多量湧水が発生して掘削作業に支障を及ぼす場合は、不良な地山に分類される。

トンネル施工時に地下水の影響が発生するのは、次のような三つの問題に分けられる。

- ① 湧水の水質が環境基準を越える場合。
- ② 湧水量の影響で掘削作業が難渋する場合。
- ③ 湧水とともに切羽が崩壊する場合。

①の場合は地下水の水質に関係するもので後述の地球化学的的要因の項で考察し、ここでは②および③の湧水量に関する問題について考察する。

②の場合には、土砂地山における間隙および岩盤地山における割れ目などより切羽における湧水がトンネル延

長1mあたり毎分約0.1m<sup>3</sup>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とロックボルトなどの作業時にコンクリートおよびモルタルが付着できずに流失するなど作業が困難になりはじめ、湧水量が増加すると作業能率とともに支保工の品質も低下する。

③の場合には、未固結含水地山および帯水部を有する断層破碎帯、高い水圧や大量湧水の地山、地すべり性地山などが該当し、事前に地下水位を低下しないと湧水とともに切羽が崩壊する危険性が大きい。これらの地山では、湧水とともに切羽が崩壊する現象は地盤工学的には類似して、以下に未固結含水地山について考察する。未固結含水地山は主に堆積層の砂層や火山灰層などで、トンネル切羽付近の土の強度は掘削の緩みと間隙水圧の影響で不安定化し易い。それを理論式により考察すると、土のせん断強度(τ)は、モールクーロンの式(1)から求められる。

$$\tau = c + (\sigma - u) \tan \phi \dots (1)$$

未固結地山では粘着力(c)はほとんど零、そして切羽付近の地山内応力(σ)はトンネル掘削の影響による緩みで小さくなり、間隙水圧(u)が何らかの原因で低下できない場合に、(σ - u)はほとんど零に近い状態になることから切羽付近の未固結含水地山の強度(τ)がほとんど零になるために、切羽の自立性が不足して崩壊すると考えられる。特に、間隙水圧が低下していない場合には流動性崩壊になり易い。

このような崩壊現象は断層破碎帯などで難透水層の背後に帯水部が存在する場合にも同様に発生する。この時、切羽の湧水量は割れ目など地山の透水係数が大きいほど、地下水位が高い(大きい土被り)ほど多い。また、地すべり移動層の厚さが100mに及ぶ深い地すべり地の陥没帯付近をトンネル掘削する場合に、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り、多量湧水が発生することがある。

### 3. 2. 3 地球化学的要因による不良地山

地球化学的要因による不良地山として高い地熱、温泉、有害ガス、酸性水などの溶出が予想される地山がある。これらの地山はつぎのような特徴を有している。

- ① 高い地熱および温泉などがある地山は、主に火山地域周辺および花崗岩の一部の高温岩体部などに分布している。
- ② 有害ガスは、油田、石炭地帯の周辺および泥質堆積岩の地山などに存在している。特に背斜構造部および断層付近に貯留し易い傾向がある。
- ③ 鉱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ズリ処理場の環境管理上の問題が生じる地山は金属鉱床およびその周辺地域などに多い。

したがって、トンネル事業にあたっては、これらの不良な地山の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する必要がある。

## 4. 地盤の力学的要因による不良地山

### 4. 1 地盤の力学的要因による不良地山の種類

一次応力状態にある地山にトンネルを掘削すると、トンネル周辺地山の応力再配分が行われ、二次応力状態に変化する。

地山を弾性体と仮定した時にトンネル周辺地山内の応力状態は、半無限板に設けられた円孔周辺の応力解として求められる。図-1に示す極座標を用いて、鉛直方向の一次応力をP<sub>z</sub>、水平方向の応力をP<sub>x</sub>とすると、地山内の二次応力は、いわゆるKirschの解の式(2~4)となる。

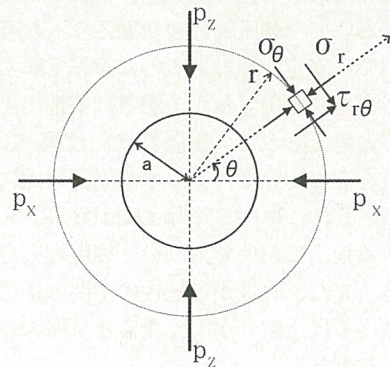


図-1 円孔周辺の応力  
Fig. 1 Stress around circular tunnel

$$\begin{aligned} \sigma_r = & \frac{1}{2} (P_x + P_z) \left( 1 - \frac{a^2}{r^2} \right) \\ & + \frac{1}{2} (P_x - P_z) \left( 1 - \frac{4a^2}{r^2} + \frac{3a^4}{r^4} \right) \cos 2\theta \\ & \dots (2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sigma_\theta = & \frac{1}{2} (P_x + P_z) \left( 1 + \frac{a^2}{r^2} \right) \\ & - \frac{1}{2} (P_x - P_z) \left( 1 + \frac{3a^4}{r^4} \right) \cos 2\theta \dots (3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \tau_{r\theta} = & -\frac{1}{2} (P_x - P_z) \left( 1 + \frac{2a^2}{r^2} - \frac{3a^4}{r^4} \right) \sin 2\theta \\ & \dots (4) \end{aligned}$$

ここに、 $a$  : トンネル掘削半径

$P_x = P_z = P$  の側圧係数が 1 の条件では上式は下式 (5~7) のようになる。

$$\sigma_r = p \left( 1 - \frac{a^2}{r^2} \right) \quad \dots (5)$$

$$\sigma_\theta = p \left( 1 + \frac{a^2}{r^2} \right) \quad \dots (6)$$

$$\tau_{r\theta} = 0 \quad \dots (7)$$

トンネル掘削による坑壁付近の地山内二次応力分布は図-2に示すとおりであり、坑壁部には応力集中を生じ、一軸圧縮応力状態となる。掘削後は吹付けコンクリートおよびロックボルト等の支保を施し、支保の内圧効果で坑壁付近の地山が三軸応力状態に補強される。掘削直後、切羽において一軸圧縮応力状態となった時に、一般の良質地山では安定状態であるのに対して膨張性地山では塑性変形を呈し、山はねが予想される地山では脆性破壊を呈すると考えられる。膨張性地山は図-3<sup>22)</sup>に示す延性の性質を有していて、トンネル周辺地山に塑性域が形成される。それに対して、山はねは図-3に示す脆性的性質を有する地山において、高い一軸圧縮応力の条件下で発生する。また、脆性から延性の中間の遷移性を有する中硬岩地山では土被りが厚くなると坑壁の変位量が大きくなる可能性がある。

#### 4. 2 膨張性地山に関する考察

トンネル周辺地山に塑性領域が形成される力学的条件を理論的に考察し、その後トンネル事例における計測

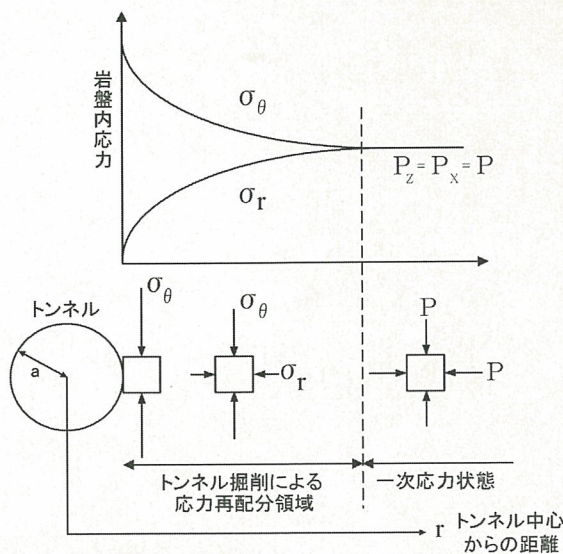


図-2 周辺地山の二次応力分布  
Fig. 2 Distribution of secondary stress around tunnel

結果と地質工学的特性について検討する。なお、計測結果の内空変位量と天端沈下量を併せて本文では坑内変位量と称す。

#### 4. 2. 1 理論解析による考察

地山を完全弾塑性体、側圧係数を1.0とした円形トンネルのKastnerの弾塑性式に支保の内圧( $P_i$ )を考慮した塑性領域の算定式は式 (8) に示される。

$$\frac{\rho}{a} = \left[ \frac{2}{\zeta + 1} \frac{\gamma H (\zeta - 1) + q_u}{P_i (\zeta - 1) + q_u} \right]^{\frac{1}{\zeta - 1}} \quad \dots (8)$$

ここに、 $\rho$  : 塑性領域の半径、 $a$  : トンネル掘削半径、 $\gamma$  : 地山の単位重量、 $P_i$  : 支保にかかる内圧、 $q_u$  : 地山の一軸圧縮強度、 $H$  : 土被り厚さ、

$$\zeta = \frac{1+k}{1-k}, \quad k = \sin \phi, \quad \phi : \text{地山の内部摩擦角,}$$

式 (8) に、地山強度比  $\alpha = q_u / \gamma H$ 、支保の内圧( $P_i$ )を土被り圧 ( $\gamma H$ ) で無次元化した支保の内圧係数  $\omega = P_i / \gamma H$  を代入すると、塑性領域の算定式は式 (9) のようになる<sup>23)</sup>。

$$\frac{\rho}{a} = \left\{ (1-k) \frac{\alpha (1-k) + 2k}{\alpha (1-k) + 2\omega k} \right\}^{\frac{1-k}{2k}} \quad \dots (9)$$

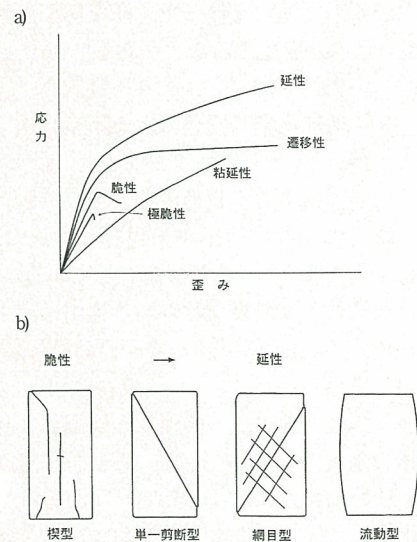


図-3 岩石の変形様式(a)と破壊形態(b)の分類<sup>22)</sup>  
Fig. 3 Classification of modes of deformation (a) and types of failure (b)



ここに、 $a$ ：地山強度比， $\omega$ ：支保の内圧係数，

トンネル掘削に伴ない周辺地山に塑性領域が形成される条件は、式(9)に示されるように、支保の内圧係数( $\omega$ )、地山強度比( $a$ )および内部摩擦角( $\phi$ )の関数となり、それらの関係を図示したのが図-4<sup>23)</sup>である。この図において、支保の内圧係数が零、すなわち素掘りトンネルの場合は、地山強度比が2以上の条件では塑性領域が形成されないことから、坑壁の自立が得られる。また、地山強度比が2以下で内部摩擦角が30度以下になると、両者の値が小さくなる程、支保の内圧係数は大きいものが必要となる。

#### 4. 2. 2 坑内変位量の実測値と地山条件

我が国の施工事例における内空変位量の実測値と地山強度比および内部摩擦角の関係を図-5<sup>24)</sup>に、天端沈下量の実測値と地山強度比および内部摩擦角の関係を図-6<sup>24)</sup>に示す。図-5、図-6において、支保工の変状がはじまる内空変位量50mm、と天端沈下量40mmを基準として、それより大きい場合に変位の程度をいくつかに分けて表している。この図を全体的に見て、変位量の大きい領域と小さい領域を区分すれば図示のように①～⑤の領域に分けることができる。それぞれの領域の主な地山条件と施工法および支保工の変形状態は以下のようなものである。

領域① 我が国の膨張性地山トンネルで最も苦勞した鍋立山T(泥岩)などにおいて導坑先進工法などの特殊工法を採用しても支保工の変状が著しい状態であった。

領域② 膨張性トンネルの典型でもある折爪T(凝灰岩)、嶺岡T(粘土質蛇紋岩)、朝日T(断層粘土)、飯山T(泥岩)などにおいて、特殊な施工法や剛性のある支保および多重支保工を採用しても坑内変位量が大きかった。

領域③ 一般的な膨張性地山のトンネルに該当し、標準支保パターンよりも剛性の大きい支保工を採用しても坑内変位量が大きく、支保の変状が生じている。

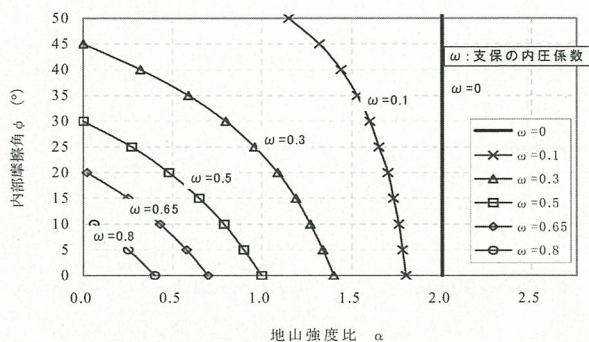


図-4 支保の内圧を考慮した塑性領域の形成条件<sup>23)</sup>  
Fig. 4 Condition for growing plastic area around tunnel

領域④ いわゆる膨張性地山のトンネルに該当し、標準支保パターンでは剛性が不足するために坑内変位量が大きい場合がある。また、内部摩擦角が30度以上の固結度の低い砂・砂礫およびシラス地山などでは、内空変位量は小さいが、天端沈下量が大きくなることがある。

領域⑤ 塑性領域の形成がなく良質な地山で、標準支保パターンの適用範囲であり、坑内変位量は小さい。

このように、施工事例の実測値において、数値のばらつきはあるものの、図-4に示した理論的傾向を裏付けることが出来た。また、図-5および図-6を考察することにより、NATMにおける膨張性地山は図-5の①～③の領域と④の領域の内部摩擦角30度以下の場合に該当すると考えられる。すなわち、膨張性地山の条件は地山強度比が2以下で内部摩擦角が30度以下となる。ただし、内空変位量が小さいために膨張性地山から除外された④の領域で内部摩擦角が30度以上の場合には、天端沈下量が大きくなる場合があり、支保工の支持力対策が必要な場合がある。

#### 4. 2. 3 膨張性地山に関する地質工学的考察

従来、膨張性の原因にはスウェリング(膨潤)とスクィージング(押し出し性)が考えられている。本文のように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該当すると考えられる。

我が国で施工された、いわゆる膨張性地山のトンネルにおける切羽の地質状態を分析した結果を表-2<sup>3)</sup>に示す。この表-2に、内空変位量および天端沈下量が基準値以上の大きな変位量区間長さを併記している。主な地質として、蛇紋岩、泥岩、頁岩、凝灰岩、メラングジュ地山、断層破碎帯および温泉余土である。表-2において、切羽全体が均質な地質状態の場合および硬質部と軟質部が混在している場合などがある。硬質部と軟質部の地質が混在している切羽では、変位挙動を反映する軟質部の試料による強度試験の結果を集積することにより、力学的実測値のばらつきがより少なくなり、解析値と整合することが予想される。

文献調査の中で、天端沈下量が大きいと考えられるトンネルにおいて、設計段階で側壁導坑先進方式や中壁分割工法などの掘削工法を採用して、支保工の天端および脚部沈下対策が事前に行われていたり、施工時に脚部補強工などの補助工法を採用することにより、天端沈下量が小さく抑制した事例も多く見られた。

以上のように、膨張性地山と評価される地質は限られていて、その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度以下と考える。

#### 4. 3 大土被りの塑性変形性地山

一般国道194号線の寒風山トンネルにおいて、新鮮な

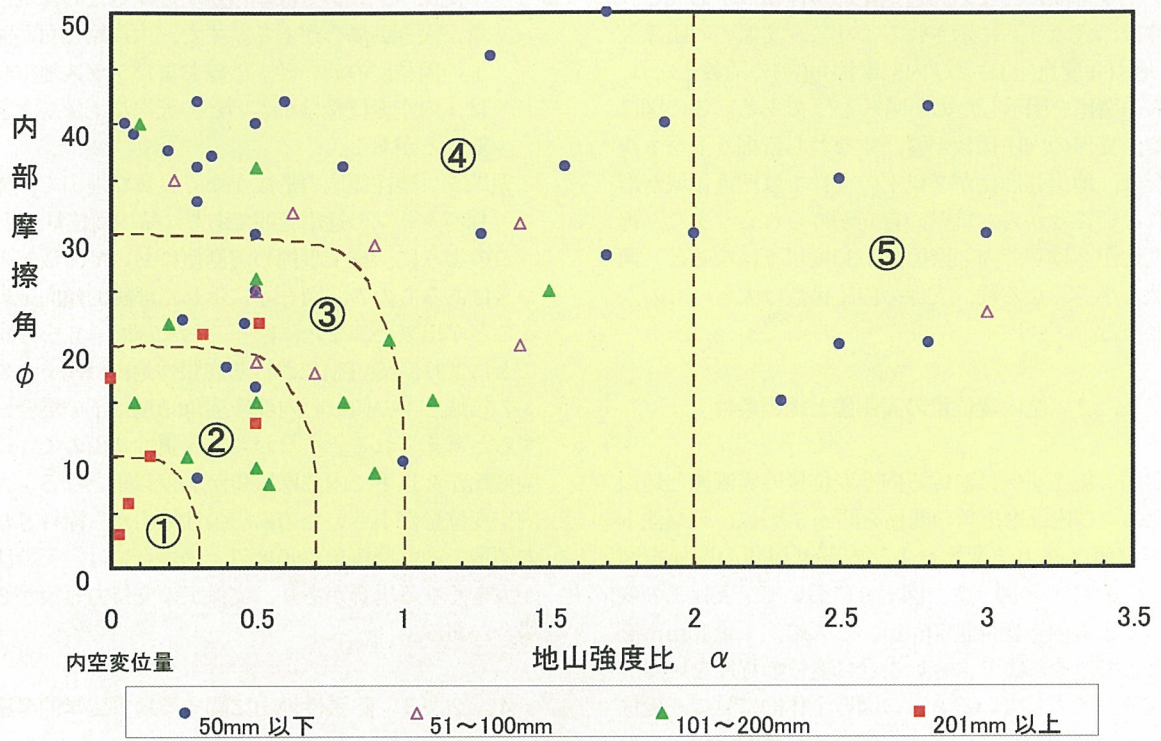


図-5 内空変位量と地山条件の関係<sup>24)</sup>

Fig. 5 Relationship between convergence value in tunnel and ground condition

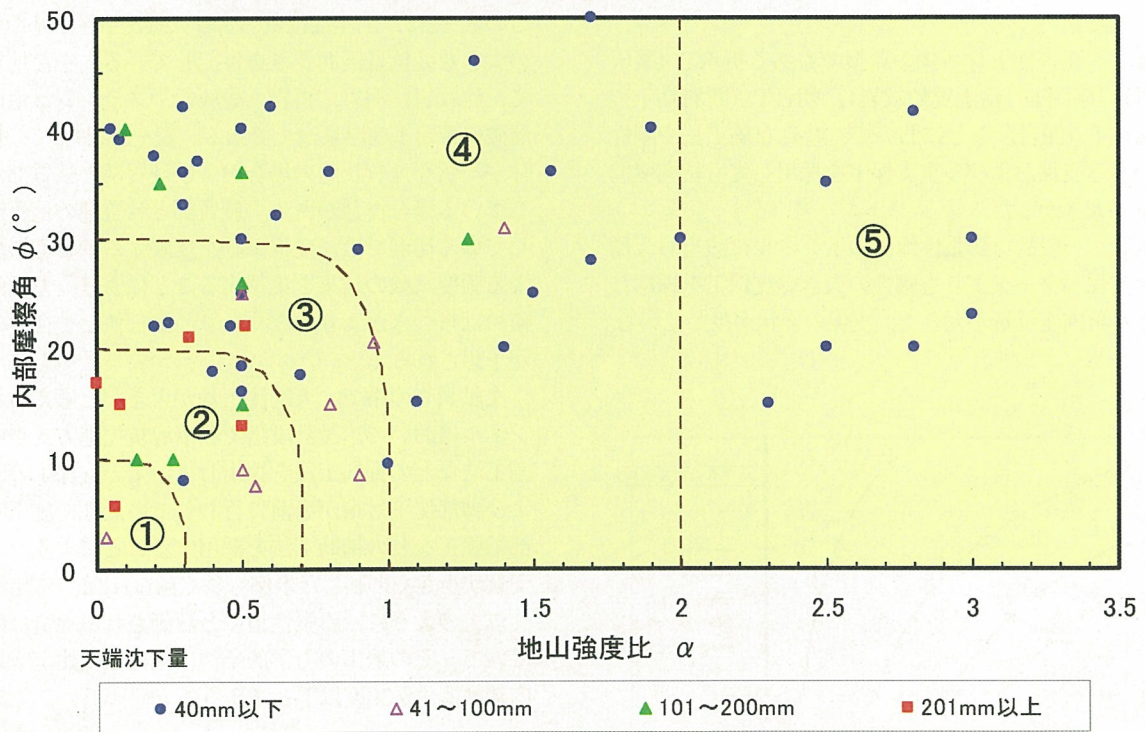


図-6 天端沈下量と地山条件の関係<sup>24)</sup>

Fig. 6 Relationship between arch crown settlement and ground condition

表-2 変位量の大きいトンネルの地山状態の分類と変位区間長<sup>3)</sup>  
Table-2 Geological classification and section length with large deformation

地質状態		地山状態		変位量50ミリメートル以上の区間長さとトンネル名 (注1、2)	
		100m未満	100~500m	500m以上	
全面軟質	整然層①②	地層の変形、変質は少ない軟岩で一軸圧縮強度は小さく、スプレッド等の粘土鉱物を含み、一軸圧縮強度に比し土破り圧が大きい場合。断層、ゆるい褶曲部で変形は特に大きい。	M: 草木、松生、金田 S: 検儀谷、福里、常磐 M: 栗師 Gr: 小川 Cl: 第一熱海、	M: 金田一、塩谷川放水路 T: 駒止、	T: 中山、岩手 M: 赤倉、
	破碎変質全面質③	断層破碎帯、構造運動等で岩質全体が大規模に破碎変質を受け、割れ目には油目、鏡肌、粘土を介在する。断層破碎帯の場合、変質粘土帯の背後に帯水部が存在すると、急激に崩壊することがある。	F: 草薙、瀬波、新牧ノ原、 S: 鬼峠、嵐山、長峰第二、藤白、北小谷、第二今泉、逢坂山、仁淀川第三登、大所山登、岩清水、 S1: 蘇山、鳴鼓、層雲峡発電所、太山、奥新冠発電所、 Gr: 春別森電所、 Cl: 定山溪	M: 鍋立山、折渡、頸城、赤倉、飯山、能生、第一白坂、日振 S: 神屋、新登川、嶺岡、大清水 F: 恵那山、朝日 Gr: 大杉 T: 豊園、折爪	
全面混在	硬軟混在③	硬質岩を有礫状に含み基質部は上の項と同様な破碎変質を受けているメランジュ地山等。硬質礫部が切羽に占める面積が多い程、土圧は小さい。破碎変質部の強度のばらつきは一般に大きい。	S: 太清水(作業坑) M: 美里、第一中の二股、里見 T: 太日坂、月山第一、		M: 大頭、信濃川水力第一、新覆 T: 新宇津 S1: 明神
	硬軟互層④	硬質と軟質が互層状に分布し、大半は軟質部で、上の項と同様な破碎変質を受けている。メランジュ地山等が該当する。硬質部の一軸圧縮強度で地山強度比を算定すると大きすぎる値となる。	F: 神長(流れ目)、 子不知、仙岩、長沢、八田原、歌 S1: 大豊、篠栗 T: 中屋、二ノ瀬 Cl: みちのく、	M: 御牧原(水平) F: 池田第二、新神戸、新芦谷、下八野 T: 盃山、	
部分的混在	帯状軟質⑤	非変質部は中硬岩~軟岩で、軟質部は破碎帯粘土や破碎性凝灰岩、泥岩の場合でアーチ支保には偏圧部に土圧が作用し、インバーには軟質部に盤ぶくれを生じることがある。軟質部の地山強度の影響が大きい。			
	断面外軟質⑥	トンネル掘削域内は非変質の軟岩であり、掘削直後は軟質部の存在に気付かないことがある。軟質部は断層破碎帯や破碎変質岩が分布し、時に地下水が変質を助長する。この場合地山強度比は大きくなる。			F: 新親不知
	地すべり⑦	地すべり面がトンネル内およびトンネル上部にあつて、基盤岩は破碎変質を受けている。トンネル掘削により地すべり挙動を誘発し易く、誘発した場合にはトンネルに作用する土圧も大きい。	M: 春日山、地藏	M: 第三大沢、且暮山、谷稲葉 S: 嶺岡、	

注1) T: 凝灰岩、M: 泥岩、頁岩、S: 蛇紋岩、C1: 温泉余土、F: 断層破碎帯、S1: 粘板岩、片岩、G: 塩基性緑色岩類  
注2) アンダーラインのあるトンネルは内空変位、天端沈下量が50mm以上の場合、無印のトンネルは内空変位量が50mm以上の場合

部分で一軸圧縮強度が20 MPaの黒色片岩の区間で土被り厚さが400m以上に達すると、内空変位および天端沈下量が50mm以上となり、剛性の大きい支保パターンに変更せざるを得なかった<sup>25)</sup>。特に、土被りが600m以上になると内空変位および天端沈下量は大きくなる傾向にある。なお、計算上、地山強度比が2となる土被りは400mであった。

このように中硬岩地山においても土被りが大きくなり、地山強度比が2以下の条件で、変形が大きい不良地山に変化する。この変形は塑性変形で膨張性地山のように著しく大きい変形ではない。この現象は式(9)の理論式から土被りが大きいために支保の内圧係数が低下したことによると考えられ、図-4、図-5、図-6において地山強度比が2以下で、内部摩擦角30度以上の中硬岩、軟岩、土砂地山が該当すると考えられる。施工時の対応策としては、切羽付近の坑壁部の地山を支保などで早期に3軸応力状態にするとともに剛性の大きい支保工を設置する必要がある。

#### 4. 4 山はねが予想される地山に関する考察

我が国の山岳トンネルにおいて山はねの事例が希少であることから海外の鉱山の事例を含めて考察する。

##### 4. 4. 1 海外の鉱山の山はね事例に関する考察

南アフリカの塊状の脆性岩盤である珪岩を掘削した鉱

山の矩形トンネルにおいて山はね現象が発生し側壁部の破壊が多く箇所で見られた。その時の支保形状と応力比(地山強度比の逆数)を研究した事例<sup>26)</sup>を表-3に引用した。表-3では地山強度比の表現に変えて、素掘りトンネルの状態および支保工の種類により、山はねが発生した時の地山状態を示している。それによると、トンネル形状を矩形からアーチ状に変えて、支保の剛性が増加すると山はねが発生した時の地山強度比が低下して、2に近づいている。

一方、カナダでは山はねに対する支保システムの研究<sup>14)</sup>が行われて、山はねの規模と破壊状態に対応した支保システムとしてロックボルト、ケーブルボルト、金網および吹付けコンクリート等の有効な組合せが提案されている。これらの支保は切羽付近の坑壁部の地山応力を3軸応力状態にする支保の内圧効果を有している。

##### 4. 4. 2 坑壁部の二次応力集中に関する考察

トンネル掘削による二次応力分布を二次元境界要素法で解析した結果のうち、坑壁部の応力集中は表-4<sup>23)</sup>のとおりである。その値は、トンネル形状と一次応力状態の側係数で異なり<sup>20)</sup>表-4のように様々で、トンネル形状が円形の場合には応力集中の割合が最も少なく、応力集中係数は概ね2と小さい。それに対して、馬蹄形および矩形の場合には、隅角部に応力集中が発生している。

ここで、素掘りトンネルの安定性は、坑壁部の最大応力より地山の一軸圧縮強度が大きいことで示される。す













表-3 南アフリカの鉱山の矩形坑道における側壁部の山はね事例<sup>26)</sup>に加筆

Table-3 Rectangular tunnels in mines of South Africa were rock burst occurred at side wall

支保形状	坑道形	岩質	一軸圧縮強度 $q_u$ (MPa)	初期応力 $P_z$ 、 (MPa)	地山強度比 $q_u / P_z$	破壊箇所
無支保の トンネル (素掘り)	矩形	珪岩	259	$P_z = 39$	6.64	側壁
		珪岩	322	$P_z = 61$	5.27	側壁
		珪岩	252	$P_z = 56$	4.50	側壁
		珪岩	170	$P_z = 52$	3.27	側壁
木製枠組 支保工	矩形	珪岩	240	$P_z = 62$	3.87	側壁
		珪岩	183	$P_z = 59$	3.10	側壁
矩形鋼製 支保工	矩形	珪岩	240	$P_z = 83$	2.89	側壁
		珪岩	183	$P_z = 73$	2.50	側壁
		珪岩	240	$P_z = 69$	3.48	側壁
		珪岩	183	$P_z = 79$	2.31	側壁
鋼製アー チ支保工	アーチ	珪岩	240	$P_z = 100$	2.40	側壁
		珪岩	183	$P_z = 88$	2.08	側壁

表-4 坑壁の応力集中係数 ( $\beta$ )<sup>23)</sup>

Table-4 Coefficient of stress concentration at tunnel wall

トンネル断面	$P_x=0$	$P_x=0.5P_z$	$P_x=P_z$
			
天端部 $\beta$	-1.0	0.5	2.0
坑壁部 $\beta$	3.0	2.5	2.0
			
天端部 $\beta$	-1	0.6	2.25
坑壁部 $\beta$	2.1	1.65	1.35
隅角部 $\beta$	5.5	6.5	8.75
			
天端部 $\beta$	-0.9	-0.05	0.9
坑壁部 $\beta$	1.8	1.3	0.9
隅角部 $\beta$	5.0	6.8	8.5

ここで、素掘りトンネルの安定性は、坑壁部の最大応力より地山の一軸圧縮強度が大きいことで示される。すなわち、一軸圧縮強度 ( $q_u$ ) がトンネル形状と一次応力状態で決まる坑壁部の応力集中係数 ( $\beta$ ) と鉛直一次応力 ( $P_z$ ) との積より大きい場合が安定となり式 (10) で示される<sup>23)</sup>。

$$q_u > \sigma_\theta = \beta \cdot P_z = \beta \gamma H \dots (10)$$

ここに、 $\gamma$  : 地山の単位体積重量,  $H$  : 土被り厚さ  
式(10)を地山強度比の形にすると式 (11)<sup>23)</sup>となる。

$$\frac{q_u}{\gamma H} = \alpha > \beta \dots (11)$$

この式(11)から、素掘り状態のトンネルにおいて安定を得るには、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が必要条件となる。

南アフリカの鉱山における山はね事例の表-3と坑壁の応力集中係数の表-4を考察すると以下のとおりである。

- ① 矩形素掘りトンネルにおいて山はねが発生した時の地山強度比が3.2~6.6は、矩形トンネルの応力集中係数にはほぼ一致している。
- ② 矩形トンネルで支保工を設置した時の応力集中係数は3.8以下となり、支保の剛性が大きくなると応力集中係数は小さくなり2.5に接近する。
- ③ 鋼製アーチ支保工を設置した時に山はねが発生し

た地山強度比は2.0~2.4と小さくなり、円形トンネルの応力集中係数に近づく。

支保の剛性が増加すると、支保の内圧効果も大きくなり坑壁部の地山が三軸応力状態になると考えられる。

#### 4. 4. 3 我が国の山岳トンネルにおける山はね事例

我が国の山岳トンネルで山はねが発生した事例は表-5に示すとおりである。そのほとんどが谷川岳を貫く鉄道トンネル3本(新旧清水トンネル、大清水トンネル)と道路トンネル2本(関越トンネル上下線)で、いずれのトンネルでも土被り厚さが約730m以上で、割れ目が少なく、湧水の無い石英閃緑岩において山はねが発生している。いずれも地山の鉛直応力が原因していると考えられ、側壁部および切羽部で山はねが発生している。

国道140号線の雁坂トンネルでは、土被り厚さが約240mの花崗閃緑岩のところで、避難坑の天端部で厚さ数センチの板状の山はねが一昼夜以上連続で発生した。原因調査のために初期応力を測定したところ、垂直応力はほぼ土被り荷重に近似していたのに対して水平応力は垂直応力の約4.2倍であることが判明した<sup>27)</sup>。山はね対策として、設置直後に定着効果を有するスエレックスボルトを先受け工的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た。この支保機構は切羽付近の坑壁部地山を3軸応力状態に近づけて山はね対策としている。

広島西風トンネルでは土被りが約40mの花崗岩の箇所山はねが天端部で発生し、初期応力を測定したところ水平応力は鉛直応力の約7倍であった<sup>28)</sup>。雁坂トンネルと同様な支保構造で対応している。

神岡鉱山において山はねが発生した黒雲母角閃石片麻岩の区間は、土被りが約950mで鉱山の中でも割れ目の少ない岩盤域であった<sup>29)</sup>。同様の岩盤でも割れ目の多い区間では山はねは発生していないと報告されている。

このように、山はね現象は割れ目の少ない硬質の脆性岩盤で発生していて、我が国では事例が少なく、岩質としては花崗岩、石英閃緑岩、黒雲母角閃石片麻岩である。

近年、支保構造がNATMとなり、坑壁部の地山は支保の内圧効果による3軸応力状態が確保され、山はね現象は発破直後の切羽部に限定できるようになりつつある。

#### 4. 5 地すべり地山に関する考察

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。また、移動層が破碎されていない場合と破碎されている場合があり、破碎の程度によって移動層の物性値は基盤岩の物性値と同様な値を示す場合から極端に

表-5 山はね現象が発生した我が国のトンネルの概要と対策工  
Table-5 Tunnels of rock burst in Japan

トンネル名	施工法	支保工	掘削断面積 (m <sup>3</sup> )	土盛り厚さ (m)	地質	山はねの位置 側圧係数 (計測)	山はね対策
清水 (上越線)	低設導坑先進工 法 (矢板工法)	松丸太 松板	30	約 1,200	石英閃緑岩	導坑側壁	・待機時間の延長
新清水 (上越線)	全断面掘削工法 (矢板工法)	鋼製支保工 ロックボルト	35.4	約 1,000	石英閃緑岩 ホルンヘルス	側壁	・鋼製支保工と矢板による天端、側壁防護 ・待機時間の延長
大清水 (新幹線)	全断面掘削工法 (矢板工法)	鋼製支保工 ロックボルト	85.4	約 500 以上	石英閃緑岩	切羽天端～側壁 切羽後方 20m	・ロックボルト、落石防止網 ・鋼繊維吹付け CON、待機時間の延長
関越 (下り線)	全断面掘削工法 (矢板工法)	鋼製支保工 ロックボルト	84.2	約 750 以上	石英閃緑岩	切羽	・一掘進長さの短縮(1.2m)、鏡ボルト ・待機時間の延長
関越 (上り線)	全断面掘削工法 (NATM)	ロックボルト 吹付け CON	85.0	約 300 以上	石英閃緑岩	切羽天端～側壁	・一掘進長さの短縮(1.5m)、鏡ボルト・鋼繊維吹付け CON、待機時間の延長 (AE 計測)
神岡地下観 測所坑道	全断面掘削工法	ロックボルト	約 15	約 950	黒雲母角閃石 片麻岩	側壁肩部 側圧係数約 0.4	・ロックボルトの増し打ち
雁坂 (避難工)	全断面掘削工法 (NATM)	ロックボルト 吹付け CON	18	約 240	花崗閃緑岩	天端 側圧係数約 4	・鋼繊維吹付け CON、鏡ボルト、AE 計測 ・フリクシヨントタイプのロックボルト
雁坂 (本線)	全断面掘削工法 (NATM)	ロックボルト 吹付け CON	60	約 240	花崗閃緑岩	天端 側圧係数約 4	・鋼繊維吹付け CON、AE 計測 ・フリクシヨントタイプのロックボルト
西風	全断面掘削工法 (NATM)	ロックボルト 吹付け CON	71.4	約 40	花崗岩	天端 側圧係数約 7	・鋼繊維吹付け CON、AE 計測 ・フリクシヨントタイプのロックボルト

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ので、以下に地すべり地を構成する岩質および地盤物性について検討する。

4. 5. 1 すべり面の物性値

我が国の「活動した地すべり」のみ50事例を対象にして逆算法で求めた地質毎のすべり面のせん断強度を表-6に示す<sup>30)</sup>。

また、トンネル掘削事例の文献からすべり面のせん断強度が明記されたものを表-7<sup>5)</sup>に示す。これらのトンネルの中ですべり面の力学試験が実施できたものは、テストピットを採用した地蔵トンネルとボーリングコアによる谷稲葉トンネルの2トンネルであった。他のトンネルの値は地すべり安定解析に基づき逆算して求めたものである。

これらの結果からすべり面のせん断強度は、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ことがわかる。地すべり地でのトンネル施工時には、このようなすべり面の値に基づいて地すべり安定対策工を設計・施工している。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。

4. 5. 2 移動層と基盤岩の物性値

地すべり地の基盤岩の岩質には、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。地すべり地のトンネル掘削では表-8<sup>9)</sup>に示すように、基盤岩の状態が比較的良好な場合と破碎変質などで不良なものに区分できる。この表より、移動層については、基盤岩の状態とほとんど変わらず、破碎されていない場合と破碎されて不良な場合がある。

以上のような状況から、トンネルが遭遇する地すべり地での岩盤状況は次のように3区分される。

<基盤岩の状態が良好な場合>

- ① 移動層の破碎の程度が小さい場合
- ② 移動層が破碎されている場合

<基盤岩の状態が不良な場合>

- ③ 移動層の破碎の程度に関係なし

地すべりによる変位を別にして、トンネル掘削で地山物性値が問題になるのは②、③のケースである。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表-9に示す。表-6、表-7、表-9に示した移動層および基盤岩の物性値は内部摩擦角も概ね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。これらの値は4.2項で考察した膨張性地山の条件と一致している。

表-6 地質毎のすべり面のせん断強度 (逆算値) <sup>30)</sup>

Table-6 Shear strength of slip surface in landslide

地質	事例集	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 <sup>2</sup>	13°
結晶片岩	18	0	27
中古生層	11	0	29
第三、四紀層	18	1	10

表-7 地すべり面の物性値 <sup>5)</sup>

Table-7 Property values of slip surface in landslide

トンネル名	基盤の岩質	土被り厚 (m)	地すべり面の物性値			備考
			γ	c	φ	
阿部倉	破碎性泥岩	20	(20) kN/m <sup>3</sup>	15 kN/m <sup>2</sup>	15°	逆算&推定値
谷稲葉	泥岩	15	20	52	33	
地蔵	泥岩	10	19	5	10.3	
足羽山	凝灰岩	8	20	8	25	推定値
石鎚	砂岩・泥岩	18	(20)	25	20	逆算
的之尾	黒色片岩	20	20	30	26	逆算&推定値

表-8 地すべり地の岩質と基盤の状態<sup>5)</sup>  
Table-8 State of basement rock in landslide area

地質	基盤状態	トンネル名
泥岩、 頁岩、 粘板岩	良	郷津、新潟薬師、山中、宮内、 湯上、舞子、阿部倉、大谷、石鎚
	不良	地蔵、春日山、第2白坂、日暮山 上野、谷稲葉、岡部、静岡薬師、 泊、牧の原第3、衣笠城址、比津、 第3大沢、
凝灰岩 火山岩	良	浅利、望洋台、三平山、礼文浜、 木原、白湯
	不良	西鴉川
片岩類 破碎帯	不良	妙見、的之尾、大杉、犬寄
蛇紋岩類	不良	嶺岡、平岩第一、北小谷、 検儀谷

#### 4. 5. 3 トンネル施工時の問題と対策

良好な岩盤からなる基盤岩中をトンネル掘削する場合、緩み域や変位が小さければ地すべり移動層が近接していても地すべりへの影響は無視できる場合がある。しかし、地すべり地の破碎された移動層および不良な基盤岩におけるトンネル掘削は、土被り厚さが比較的薄いにもかかわらずトンネル周辺地山に広い範囲で塑性域が形成される。そのために、地すべり地のトンネル施工に際しては

地すべり地山の安定対策工、切羽前方地山の補強工およびトンネル支保の変状対策が実施され、あわせて各種の計測管理が行われている。

特に注意を要するのはトンネル掘削が移動層のルーズな部分（地すべりの引っ張り領域）に遭遇した場合で、切羽が急激に崩壊することがある。トンネル掘削が移動層を通過する場合は、地すべり地における陥没帯をはじめとする引っ張り領域の分布に十分な注意を払い、場合によっては注工等の対策を行う必要がある。

なお、トンネル掘削により地下水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。

#### 4. 6 地盤の強度特性を考慮した岩種分類

以上の考察により、地盤の力学的要因による不良地山は、トンネル掘削時に坑壁部が塑性破壊、脆性破壊およびすべり面のせん断破壊などの力学的現象が発生していることから、岩盤の強度特性が重要な判定条件である。特に、地山強度比が2以下で内部摩擦角が30度以下の地山では塑性破壊およびすべりせん断破壊が生じ易い。

以上の観点より、岩種ごとの内部摩擦角と一軸圧縮強度に着目し、文献調査<sup>22), 26)</sup>他によって、岩種分類を行った結果を図-7<sup>23)</sup>に示す。この図-7では内部摩擦角が30度以下をc地山、30度以上をφ地山としている。

#### 5. 地下水の影響による不良地山

3. 2. 2の項で述べたように、山岳トンネルの掘削作業において湧水量の影響により、次のような二種類の問題が発生する。

表-9 地すべり移動層と基盤岩（不良状態）の物性値<sup>5)</sup>

Table-9 Property values of landslide material and basement rock in landslide

トンネル 名	地すべり移動層				基盤岩				備考
	$\gamma$	c	$\phi$	$\alpha$	$\gamma$	c	$\phi$	$\alpha$	
泊	(18)	28	10	0.74	(19)	58	9.5	0.5	
谷稲葉	20	110	18	0.75	22	87	31	0.5	
地蔵	17	*		0.1	2.2	40	7.4	0.4	* $q_u = 21 \text{ kN/m}^2$
春日山					20	50	15	0.13	
足羽山					20	30	25	0.47	推定値
三平山					(20)	6	33	0.2	
的之尾	20	30	26	0.2	22.5	50	26	0.3	逆算&推定値

注)  $\alpha$ : 地山強度比、 $\gamma$ :  $\text{kN/m}^3$ 、c:  $\text{kN/m}^2$



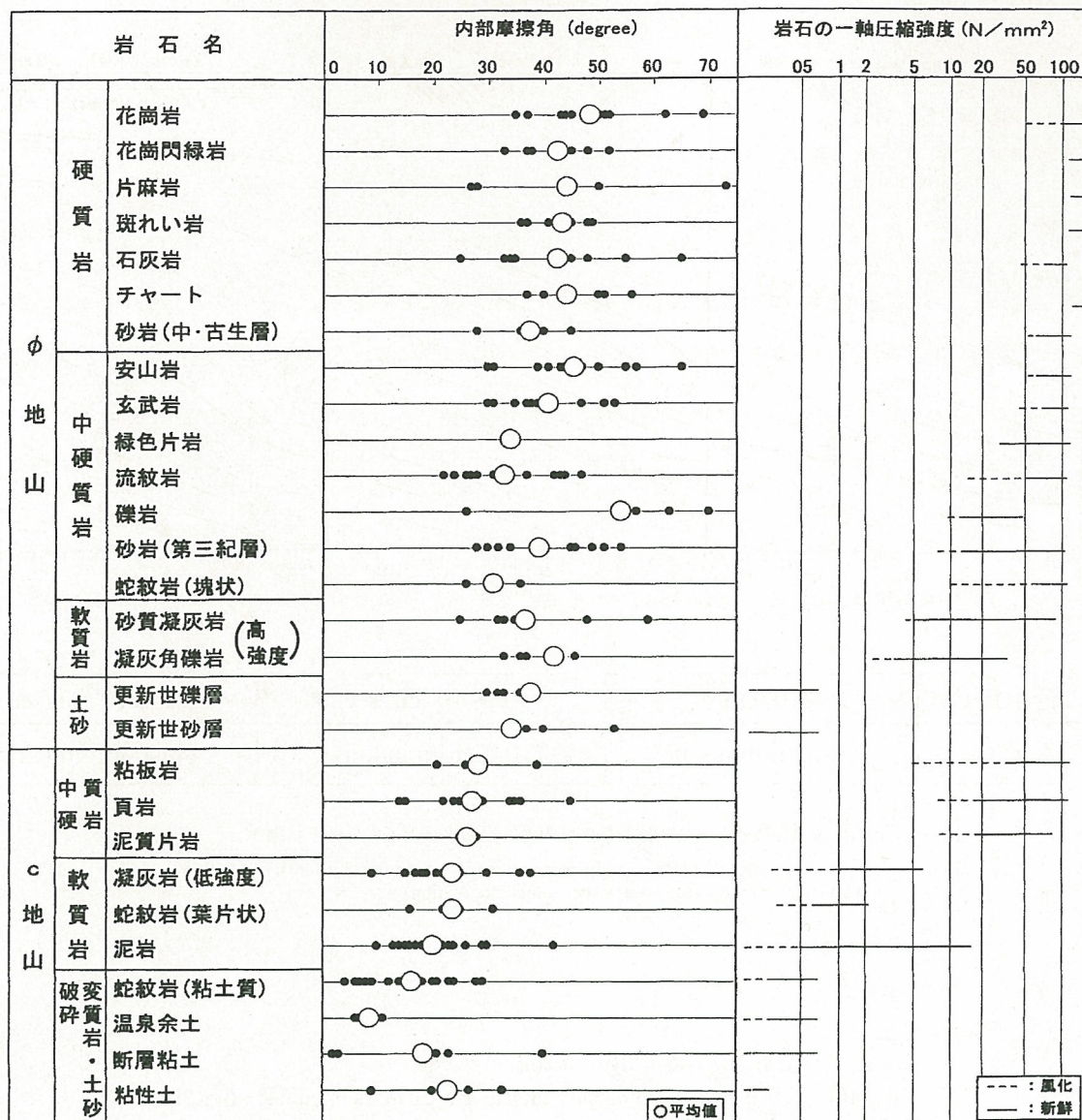


図-7 岩種ごとの内部摩擦角と一軸圧縮強度表<sup>23)</sup>

Fig. 7 Table of some rocks with angle of internal friction and unconfined compressive strength

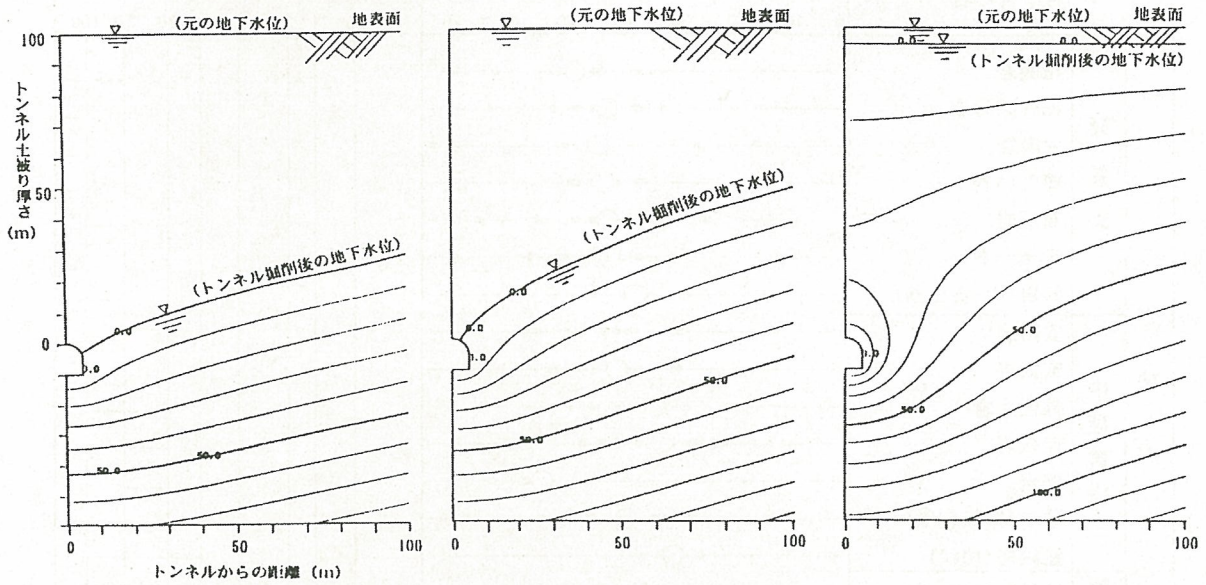
- ① 多量湧水によりトンネル掘削作業が難渋する。
- ② 湧水に伴なって切羽が崩壊する。

以下にそれぞれの問題と地下水との関連について考察する。

### 5. 1 トンネル掘削による地下水位の影響

トンネル掘削による坑内湧水量と周辺地山の地下水位の影響を検討するために、次のような条件により二次元浸透流解析を行った<sup>4)</sup>。地下水位は地表面として、側方の境界より地下水の供給がある条件で、地山の透水係数を  $1 \times 10^{-3}$ 、 $10^{-5}$ 、 $10^{-7}$  cm/secとして地表面下100m地点にトンネルを設置した。解析した結果は図-8に示すとおりである。

図-8から、坑内湧水量が少ないのは、地山の透水係数が  $1 \times 10^{-5}$  cm/sec以下で、この場合、坑内への湧水量は極僅かで、施工上の問題にはならない。一般に、土質および岩盤地山の透水係数は表-10<sup>31)</sup>に示すとおりで、概ね  $1 \times 10^{-6}$  cm/sec以下の場合を難透水性地山と称して、掘削の影響による地下水位の変化もトンネル周辺地山付近の狭い範囲に限定され、周辺地域の湧水問題も生じない状態と考えられ、この解析結果と整合している。それに対して、地山の透水係数が  $1 \times 10^{-5}$  cm/secより大きい場合には、大きくなるほど坑内湧水量は増加し地下水位の低下量および低下範囲も拡大する。



地山の透水係数	$1 \times 10^{-3}$ cm/sec	$1 \times 10^{-5}$ cm/sec	$1 \times 10^{-7}$ cm/sec
坑内湧水量	12.2m <sup>3</sup> /min/km	0.02m <sup>3</sup> /min/km	0.0004m <sup>3</sup> /min/km

図-8 地山の透水係数とトンネル掘削後の坑内湧水量および地下水位低下状態<sup>4)</sup>

Fig. 8 Relationship among coefficient of permeability in ground and quantity of inflow and dewatering groundwater level after tunnel excavation.

表-10 土質および岩盤地山の透水係数<sup>31)</sup>に加筆

Table-10 Coefficient of permeability in soil or rock mass (modified after 31)

透水係数 (cm/sec)	10 <sup>2</sup>	10 <sup>1</sup>	10 <sup>0</sup>	10 <sup>-1</sup>	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-7</sup>	10 <sup>-8</sup>
透水性	良好						わずか	実質上不透水性			
土質地山	清浄な礫		清浄な砂および砂礫			微細砂、シルト、砂質シルト および粘土質砂			粘土		
岩盤地山	滞水層および破碎帯						割れ目の少ない岩盤		割れ目が極めて少ない岩盤		

5. 2 岩種ごとの透水係数

一般的な地山の透水係数は表-10に示されていて、シルト、粘土地山および割れ目の少ない岩盤の透水係数は概ね10<sup>-6</sup> cm/sec以下で、難透水性を呈している。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。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。

地山内の割れ目に粘土が介在する岩種は、表-11<sup>32)</sup>に示した岩石の風化特性に関係すると考えられる。この表より、割れ目に粘土を介在する岩種は、斑れい岩、蛇紋岩、粘板岩、頁岩、泥岩、凝灰岩、安山岩、玄武岩、片麻岩、および結晶片岩の一部が該当すると考えられる。

このような地山の透水係数は図-7の岩種ごとの力学的性質とも次のように関連している。

表-11 岩石の風化特性<sup>32)</sup>

Table-11 Weathering characteristic of rock

岩種	粒度変化	備考	分布
花崗岩 閃緑岩	基岩→岩塊→礫→砂 砂→シルト	風化物が厚く、まさ土になりやすい。 花崗岩よりも閃緑岩の方が風化し易い。 粘土分は少なく、大部分カオリナイトで ある。不連続粘度を示す。	大
斑れい岩	基岩→岩塊→粘土	極端に粘土化する。カオリナイト・ハロ イサイト	小
蛇紋岩	基岩→岩塊→粘土 葉片状	極端に粘土化する。	極小
石英斑岩 流紋岩	基岩→礫→砂利	一般に風化しにくく、風化層は薄い。 流紋岩の中で凝灰質なものは風化し、モン モリロナイトも少量みられる。	やゝ 大
安山岩 玄武岩	基岩→岩塊 岩塊→粘土	密実なものは風化しにくい、やや粗粒 なものは細粒化する。	やゝ 大
粘板岩 頁岩 泥岩	基岩→礫→砂→粘土 粘土	粘板岩は礫、砂を経て粘土になるが、頁 岩・泥岩は直接粘土になることが多い。 風化層は厚い。	大
砂岩	基岩→礫→砂 砂	古生層、中生層のものは礫から砂へ、第 三紀層のものは直接砂へ	やゝ 大
チャート	基岩→岩塊→礫 砂利	風化しにくく、礫または砂粒として残 る。風化層は薄い。	小
凝灰岩	基岩→岩塊→礫 砂→粘土	中・古生層は風化し難く、第三紀層はモン モリロナイト等粘土化し易い。	大
片麻岩・ 結晶片岩	基岩→岩塊→礫→砂 粘土	片理面から剥離して細粒化する。片麻岩 の風化層は厚い。	大

表-12 φ地山, c地山における透水係数の比較<sup>4)</sup>

Table-12 Compared the coefficient of permeability of φ-ground and c-ground

\* : ○は関係あり, ◎は関係大

岩種状態			透水係数大 (透水層)	透水係数小 (難透水層)
φ 地 山	硬質・ 中硬質岩	割目少		◎*
		割目多	○~◎	
	砂質・礫質の土砂および破碎帯		○~◎	
c 地 山	中 硬 質 岩	割目少		○
		割 目 多	粘土介在	○
			粘土なし	○~◎
	軟質岩・破碎変質岩, 粘性土			○~◎

- ① 透水性地山および帯水性地山は、φ地山の破碎変質岩と土砂および割れ目の多い中硬岩、硬質岩と石灰岩の空洞など、およびc地山の新鮮で割れ目の多い中硬岩でトンネル掘削時の湧水量は多い。
- ② 難透水性地山はc地山の破碎変質岩と土砂、軟質岩、粘土を挟在する中硬岩およびφ地山では割れ目の少ない中硬岩、硬質岩で、トンネル掘削時の湧水

量は少ない。  
以上の関係は表-12<sup>4)</sup>のように表せる。

### 5.3 掘削作業能率が低下する透水性地山

湧水の影響でトンネル掘削作業の能率が低下しはじめた湧水量(トンネル延長1m当り)は約0.01 m<sup>3</sup>/min/m

で、大幅に影響を受ける多量湧水は約 $0.05 \text{ m}^3/\text{min}/\text{m}$ で、著しく影響を受ける大量湧水は約 $0.1 \text{ m}^3/\text{min}/\text{m}$ と考えられる。これらの坑内湧水量は地盤の透水係数と地下水位に関係するが、その概略値を簡易な理論計算式であるマスカット式(12)で試算する。この式は二次元解析のために切羽での集中湧水量は求められないが、切羽が通過した後の坑内湧水量が求められる。

$$Q=2\pi k \frac{H}{\ln \frac{4H}{d}} \dots (12)$$

ここに、 $Q$ ：トンネル奥行き1m当たりの湧水量 ( $\text{m}^3/\text{min}/\text{m}$ )、 $k$ ：地盤の透水係数 ( $\text{m}/\text{min}$ )、 $H$ ：地下水位 (m)、 $d$ ：トンネル直径 (m)

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( $H$ )の関係を解析した結果を表-13<sup>4)</sup>に示す。表-13によると、地下水位が100mで透水係数が $1 \times 10^{-4} \text{ cm}/\text{sec}$ の時には湧水がある状態であり、地山の透水係数がそれより大きくなると湧水量は増加する。同様に地下水位が大きくなると湧水量は大きくなり、同じ透水係数の場合には地下水位が大きくなる程、すなわち土被り厚さが大きくなる程湧水量は多くなる。

表-13 トンネル湧水量と地下水頭と透水係数の関係<sup>4)</sup>  
Table-13 Relationship among coefficient of permeability, groundwater level and quantity of inflow.

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

ここで、切羽の多量湧水の状態を施工事例で考察すると次の3つのタイプに分けられる<sup>4)</sup>。

- ① 突発湧水とともに切羽が崩壊するタイプ。
- ② 割れ目、節理および空洞より湧水するが、良好な岩質のために切羽が自立しているタイプ。
- ③ 事前に水抜きボーリングおよび水抜き坑などで湧水量および湧水圧を低下でき、自立できたタイプ。

このような多量・高圧湧水を伴った我が国の主な施工事例は、表-14<sup>4)</sup>に示すとおりである。特に仙人トンネルにおいては、石灰岩の空洞から最大湧水量が $70 \text{ m}^3/\text{min}$ に達したが、僅か3時間後には湧水量が低減した。また、道志導水路トンネルでは湧水が予想される区間において調査・水抜き兼用の長尺水平ボーリングにより、最大 $25 \text{ m}^3/\text{min}$ の湧水量を複数のボーリングで排水し、切羽到達時には、湧水量および湧水圧を低減して安全に掘削できた。

#### 5.4 切羽の崩壊を伴う湧水地山に関する考察

未固結含水地山において湧水を伴う切羽の崩壊現象を地盤工学の観点から考察する。

山岳トンネルは、一般に沖積統の地山には適用されないため、ここで問題としている含水未固結層は、第四紀更新統と第三紀鮮新統に堆積したシルト層、砂層、砂礫層、シラス層および火山噴出物堆積層で、地下水位以下に分布している場合である。

これらの含水未固結地山に切羽から水抜き水平ボーリングを行うと、ボーリング孔内を通して土砂が湧水と共に流出する場合がある。この現象は未固結層内の間隙水圧( $u$ )とボーリング先端の水圧( $p$ )の差によって生じる浸透水が土粒子を攪拌するボーリングによるもので、テルツァギ・ベックが指摘している<sup>2)</sup>。

含水未固結層がボーリングを発生する要因は地山の相対密度、均等係数、細粒分含有量、動水勾配などが考えられる。そのうち、地山の乾燥密度と間隙比について著者達が上越新幹線・堀の内トンネル建設時に数十層の砂層、砂礫層のうちボーリングした地層と自立した層について測定した結果が表-15<sup>4)</sup>である。その結果、ボーリングした地層の乾燥密度は低く、自立した地層は高い状態で、この時の土被り厚さは約100mであった。

このように含水未固結地山におけるボーリング現象は各種の要因が相互に影響していると考えられるが、調査などでボーリングの発生を事前に把握することは困難な場合が多い。しかし、施工時に切羽前方に水平ボーリングを実施した時に湧水とともに土砂が流出する現象は、未固結含水地山内にボーリングが発生した事実を示したもので、このような水平ボーリングはボーリング現象を事前に把握できる確実な判定方法である。

ボーリングにより切羽前方の含水未固結地山内にボーリングが発生すると、図-9<sup>4)</sup>のように含水した流動性

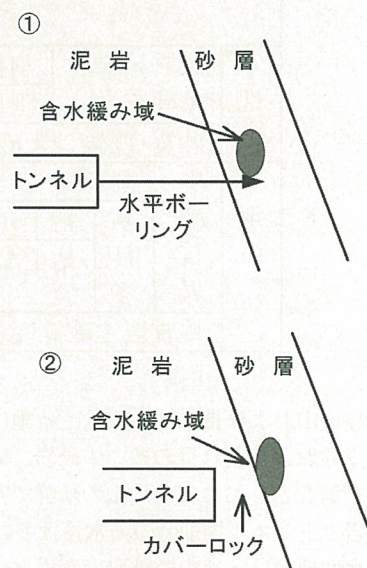


図-9 含水未固結層の崩壊過程<sup>4)</sup>

Fig. 9 Schematic illustration suggesting Process of face collapse in unhardened ground with water.

表-14 岩盤の節理、割れ目および空洞からの多量湧水事例<sup>4)</sup>  
Table-14 Tunnels with plentiful inflow in cracky rock or underground cave

出水型	地質		トンネル名	土盛り厚m	最大湧水量m <sup>3</sup> /min	湧水圧N/mm <sup>2</sup>	備考
	基盤	湧水管所の地質					
①	古生代石灰岩	石灰岩空洞	仙人T	約300	70	—	突発湧水は約3時間で低減、土砂流出約100m <sup>3</sup>
②	硬い緑色片岩	開口割れ目	福岡T(東工区)	200	5~8	1.5	さく岩機と共に作業員が飛ばされる。水抜き坑
②	花崗岩	割れ目の多い花崗岩	新神戸T	約200	11	2	硬岩中の割れ目を確認して底設導坑で強行突破
③	ホルンフェルス他	割れ目の多い貫入岩	道志導水路T	約600	25	3	500mの水平調査・水抜きボーリングによる排水
③	ホルンフェルス	割れ目の多い基盤	葛野川導水路T	約230	0.7	2.3	175mの水平調査・水抜きボーリングによる排水
③	第三紀泥岩	向斜軸と亀裂性泥岩	花立T	約60	0.7	—*	150mの水平調査・水抜きボーリングによる排水
③	中生代石灰岩	石灰岩空洞	肥後T	約200	14.7	—	水抜き兼用の作業坑をNATMから矢板工法に変更
③	花崗岩	破砕帯粘土により遮水	敦賀T	約500	14	—	12mの先進水抜きボーリングで1~3週間で減衰
③	花崗岩	破砕帯粘土により遮水	三池T	約250	6	1.2	100mボーリングにより2ヶ月で水圧低下
③	硬質安山岩類	割れ目および空隙	朝日T	約300	5	0.94	300mの水平調査・水抜きボーリングによる排水
③	安山岩質凝灰岩	破砕帯により遮水	籠坂T	約200	10	—	水抜きボーリングと水抜き導坑先進工法

表-15 切羽が流動した箇所と自立した箇所の土質性状<sup>4)</sup>  
Table-15 Soil condition of stability or unstability

切羽状況	乾燥密度 KN/m <sup>3</sup>	間隙比 e
流動化した箇所	15.1~17.5	0.742~0.447
切羽が自立した箇所	17.0~20.0	0.489~0.300

のある緩み域が徐々に拡大する。含水緩み域が形成されている所に切羽が接近してくると、その液体状態の土圧がカバーロックに作用して、突然破壊して含水緩み域を中心とした地山が崩壊し、坑内に土石流が発生する。崩壊で切羽部は土砂で埋まった形になり、その背後の未固結地山内に空洞が発生し、それを埋める形で新たに拡大した含水緩み域が形成される。その含水緩み域の土砂が、時には急激に、時には徐々に湧水と共に大規模な二次崩壊が発生することがあるので注意する必要がある。一次崩壊の土石流の量は含水緩み域の土量が影響すると考えられるが、経験上ボーリング孔口より流出した土量の約十倍から数十倍で、時には数千 $m^3$ に達することがある。

したがって、水平ボーリング時に土砂が流出した場合には直ちにボーリング孔口を閉塞して、新たに圧力調整弁付きの水抜きボーリングを実施して、土砂を流出することなく地下水位を徐々に低下させる必要がある。

この含水未固結砂層と同様な地盤性状はシラス、細粒分を含んだ砂礫層および含水未固結火山噴出岩類が該当していて、土砂の流動化のリスクが高い地山である。

### 5. 5 断層破碎帯、褶曲擾乱帯の湧水に関する考察

粘土を介在する断層破碎帯および泥質岩層と帯水層の互層地山などをトンネル掘削した際に、粘土および泥質岩層の所謂遮水層の被り厚さが薄くなった時に、切羽崩壊を伴った大量湧水が発生する場合がある。このような大量湧水量の事例を表-1に示した。

表-1の中で、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り、事前に帯水層の位置が予測できない場合でもある。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、特に断面積が大きい切羽が崩壊した場合には流出土量は大きくなり、危険性が増大する。

このような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。地質踏査の仕様がルートの片側500m位に設定されている場合が多いが、これでは断層の把握は不十分で、片側1~1.5kmは必要ことがある。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から、広めに踏査をしないと断層など見落としがちになるからである。踏査時に断層露頭を発見できるケースは余り多いとは言えない。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、地層のくいちがいやずれ、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。

トンネル掘削において断層破碎帯での切羽崩壊を防止

するには、切羽前方地山の帯水状態を事前に把握することであり、水平ボーリングおよび探り長尺穿孔(掘削径に相当する長さ以上)などで帯水箇所を把握し、水抜きボーリングおよび水抜き坑を施工して徐々に地下水圧を低下させる方法が経済的で実用的である。なお、水抜きボーリングを施工している時に、孔口より湧水とともに土砂の流出が発生した場合には、含水未固結層と同様に圧力調整弁付きのボーリングを行い、土砂を流出することなく地下水位を低下させなければならない。

### 5. 6 地すべり地山の湧水に関する考察

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。地すべり深さが深くなる程、地下水圧は大きくなる。このような陥没帯付近をトンネル掘削すると、湧水と共に切羽崩壊が発生することがある。

したがって、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十分な対策を行う必要がある。対策としてはトンネル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が、このような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。

### 5. 7 地質条件によるトンネル湧水の分類

以上、トンネル湧水問題として掘削作業を困難にする多量湧水の場合と切羽崩壊を伴う場合について考察した。また、湧水に関する地質条件は、未固結含水層、硬岩・中硬岩の節理・割れ目(多)、空洞(有)、断層破碎帯および地すべり地山に区分できた。それらの地質条件に地質構造を考慮すると、表-16<sup>4)</sup>のように分類できる。この表には、我が国で施工されたトンネル事例とそれぞれの湧水現象および主な対策工法を併記している。


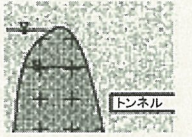


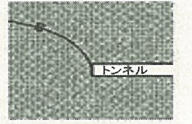
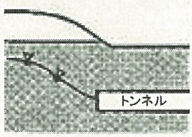

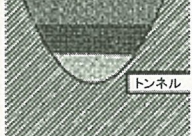

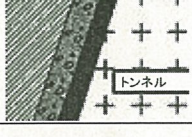
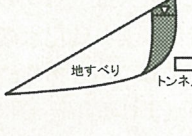
未固結含水層の地質構造には水平層から緩傾斜、難透水層との互層および未固結火山噴出物などが不整合で分布する場合があり、それぞれの地質構造によって湧水状態および対策工法が異なる。

洞窟水には溶蝕による洞窟と鉱山跡などの人工的な地下空洞に貯水されている場合があり、いずれも大量の突発性湧水となるので注意する必要がある。

節理および割れ目に起因する透水性地山には、火山岩類などの貫入によるものと、硬質・中硬質岩の節理および割れ目の多い地山があり、割目の密度および土被りが大きいと湧水量が多くなるとともに切羽の崩壊の危険性も高まるので注意を要する。

断層破碎帯には全体が粘土質の場合と砂層・礫質で帯水部となっている場合および粘土質部分と砂層・礫質部

表-16 工事例によるトンネル湧水現象と地質構造の関係<sup>4)</sup>  
 Table-16 A classification of tunnel inflow due to geological condition

湧水現象および地質構造		地質モデル	湧水現象と自立性	地下水対策工法	トンネル施工事例	
掘削作業能率を低下させる透水性地山(時に切羽崩壊のリスクあり)	洞窟水	溶融(カルスト) 地下空洞の貯水 他 	切羽の割れ目より集中湧水、発破後突発湧水で切羽崩壊	水抜き Boring, さぐりノミ, 空洞充填グラウト	肥後T、叶山T他	
	裂か水	貫入岩による割れ目岩盤		貫入岩の前後で突発湧水、時には切羽崩壊	水平水抜き Boring, 水抜き坑, 薬液注入	塩尻T、青函T、蔵王T他
		割れ目の多い岩盤		時に切羽で集中湧水、粘土目で崩落	水平水抜き Boring,	紫尾山T、雁坂T 葛野川導水路T、福岡T他
	破碎帯水	粘土質破碎帯		破碎帯突破直後に突発湧水、時に切羽崩壊	水平水抜き Boring, 水抜き坑, 薬液注入	籠坂T、恵那山T、日足T、新神戸T他
	地層水	固結帯水層		崩壊現象がなく、切羽、坑壁より湧水	特になし 多量湧水の場合に水抜き Boring	大船送水T、榛名T他
湧水と共に切羽崩壊のリスクが大きい地山	地層水	未固結帯水層		わずかな湧水とともに切羽崩壊、切羽崩壊後に地表沈下・陥没	ディープウェル, 薬液注入, ウェルポイント, 水抜き Boring, 薬液注入	習志野台T、国分川分水路T、帷子川分水路T、生田T他
		難透水層との互層		難透水層の割れ目より湧水、突発湧水と共に切羽崩壊	水平水抜き Boring, 水抜き坑, 薬液注入	浦佐T、堀之内T、信発導水路T他
		帯水層が不整合で分布		多量の湧水と共に土石流状崩壊、湧水と共に山鳴り現象	水平水抜き Boring, 水抜き坑, 薬液注入	安房T、中山T、加久藤T、第2串内T他
	断層破碎帯	帯水層を有する破碎帯		切羽の割れ目より多量湧水、破碎帯の土砂流出	水平水抜き Boring, 水抜き坑, 薬液注入	六甲T、大町T、清水T、蔵王T他
		変質粘土帯と帯水層を有する破碎帯		礫混じり土の押し出し崩壊、湧水と共に山鳴り	水平水抜き Boring, 水抜き坑, 薬液注入	恵那山T、丹那T、青函T、関門T他
	地すべり	地すべり頭部陥没帯に地下水が貯水		トンネル切羽が地すべり陥没帯に接近すると湧水とともに切羽崩壊	水抜き坑道, 水抜き Boring	日暮山T他

分を合わせた場合が考えられ、それぞれの湧水状態および施工時の対策は表-16に示すとおりである。

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の位置を予想する場合にも、湧水量を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必要である。

## 6. 地球化学的要因による不良地山

山岳トンネルにおいて、地球化学的要因による不良地山として高い地熱、温泉、有害ガスなどが賦存する地山は昔から挙げられているが、最近では環境保全の観点から鉱化変質岩などに起因する酸性水および重金属類の溶出が予想される地山が加えられる。

これらの不良地山について、トンネル施工時にはそれぞれの特性に対応した対策が必要になることから、個別の条件について慎重に分析する必要がある。

### 6. 1 地球化学的要因による不良地山の分類

地球化学的要因による不良地山において山岳トンネル施工時には次のような異常な状態および現象が発生することがある。

- ① 高い地熱および温泉などがある地山では坑内温度が上昇し、作業環境が悪化することがある。
- ② 有害ガスの内、可燃性ガスなどが存在する地山では、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嚴重な注意が必要である。
- ③ 有害ガスである硫化水素および酸素欠乏空気などの噴出により労働安全上の健康障害などが発生することがあり、安全管理が必要である。
- ④ 鉱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掘削場の環境管理上の問題が生じることがある。

したがって、トンネル事業にあたっては、これらの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採用する必要がある。そのために、これらの不良地山について個別に地質工学的考察を以下に行う。

### 6. 2 高い地熱、温泉などの可能性がある地山

高熱岩盤の分布は限られるが、火山国とも言われる我が国の特徴とも言える。しかし、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(高温岩体と呼ぶ)もある。高温岩体としては地質年代の若い花崗岩体が代表的で、直接火山活動と関係しているわけではない。マグマが地下深部で固結する場合、深部断熱効果で百万年単位の超長期間にわたって高温を維持しながらゆっくりと冷却するので岩盤の高温条件を生む。地表に露出していなくとも、深部に高温の若い深成岩体

が存在すれば、その熱的影響で周囲の古期岩もかなりの高温になっていると判断される場合がある。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°C以上の湧水があり<sup>33), 34)</sup>、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。この場合の熱源はマグマの深成活動の可能性もあるし、焼岳の火山活動に関連したものかも知れない。

穂高岳周辺には地表に現出する岩体では、世界一若いとされる約100万年前に形成された花崗岩体が露出し<sup>35)</sup>、<sup>36)</sup>、付近は比較的高い地熱を保持している。岩手-秋田県境の仙岩地熱地帯には、深さ2000-3000m付近に500°Cの高温の花崗岩体の存在が知られ、その上部の第三紀層に高温の地熱対流を生じさせ、地熱発電として開発されている。地表に露出しないものの、この花崗岩体は数十万年前の貫入といわれる。このように、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-温熱地帯が点在している。

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<sup>37)</sup>。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。

活火山ばかりでなく、第四紀前期-中期に活動した若い火山岩からなる地域の地下深部には高温部が残存していて地熱が高い場合もある<sup>38)</sup>。通産省(現経済産業省)が実施している日本の地熱エネルギー資源の重点検討対象として全国28箇所が選ばれていて、大部分が上記のカルデラ構造関連か、活動を停止した若い火山地域である。仙岩・栗駒・蔵王などは代表格である。そのような地域に山岳トンネルを掘削する場合も高温対策を予め講じておく必要がある。

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し、できるだけ調査坑を施したい。また、安房トンネルでは事前調査段階で、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た。

### 6. 3 可燃性ガスの発生が予想される地山

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望まれる。

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を発生しやすい<sup>39)</sup>。かつて、炭坑で発生したガス爆発による幾多の事故を、含炭地域においてトンネルを施工するに際して忘れてはならない。古第三紀層がまとまって分布する石狩・夕張地方、道東釧路、常磐地域、北九州・佐世保地方と、陸成三畳系の分布する山口県南部などに炭田が知られている。古い資料であるが、大概の炭田地域では「炭田地質図」(旧地質調査所・北海道地質研究所発行)が公刊されていて、石炭層の賦存状況が示されているので、計画段階での参考資料となろう。

他方、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。かつてエネルギー資源として採掘されたこともある。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。

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ことは言うまでもない。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。断層関連の場合は、断層粘土の不透气効果で、断層の傾斜角によっては破砕帯がキャップロックの役割を果たす。例えば、新潟平野-上越地方の新第三紀層では、寺泊層・椎谷層とその相当層(中新統・鮮新統)は含油層としてよく知られ、トンネル掘削の際は可燃性ガスへの注意は欠かせない。また、掘削対象が含油層準でなくとも、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<sup>40)</sup>、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。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。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。

メタンは水溶性であり、圧力に比例して溶解度は高くなるので、地下の封圧下での溶解度は更に増す。水溶性ガスは、第四紀層など未固結堆積層中にもしばしば胚胎し、圧力減に伴い水から遊離する。比較的大きな平野下(石狩、関東、新潟、濃尾、大阪、滋賀など)とその周辺丘陵・山地には、1,000m以上もの厚さの第四紀層があり、ガス濃縮部の存在状態には注意を要する。泥質物に含まれる有機物が熟成、ガス化し、水溶性の一部が遊離して砂層や砂礫層中に滞留しているのである。それらの砂(礫)層はレンズ状をなして側方へ連続しないことも多いので、地表からのボーリング調査で把握できない場合もある。含水比の高い東京湾周辺や諏訪湖周辺では、シールド工法による地下トンネル掘削の際に、水溶性天然ガスの発生が知られている。東京湾周辺-関東平野の沖積層では有楽町層と下位の七号地層の境界付近にメタンガスの滞留が多いという指摘がある<sup>41)</sup>。これらの新期未固結堆積物の場合、十分な換気その他、圧気工法又は薬液注入なども採用される。シールド内にガス検知システムを導入して常時対応も必要である。諏訪盆地では湖成堆積物の深度40-90mにガスが賦存しているという<sup>42)</sup>。平野部の地表下数十m深度での土木工事は、様々なインフラ設備の施工が今後も絶えることはないであろう。沖積層ばかりでなく、いわゆる洪積層についても水溶性ガス、酸欠、硫化水素などへの注意と慎重な対策が望ましい。

#### 6. 4 有害ガス等の発生が予想される地山

火山の噴気活動として亜硫酸ガス(SO<sub>2</sub>)や硫化水素(H<sub>2</sub>S)は、登山者の事故などで知られているように非常に危険であり、火山周辺での工事の際は要注意であるが、第三紀層・第四紀層の堆積岩でも硫化水素が発生することがある。非火山性の硫化水素(H<sub>2</sub>S)は、還元反応として硫酸還元菌などを媒介として形成されると考えられる。地表は通常酸化環境であるが、トンネルのような地下の閉じられた空間では、土丹地山における鉄分などの酸化による酸素の消費によって酸欠状態→還元状態が発生し得る。この反応はトンネルのような閉塞された場所でごくゆっくり進行するので、泥岩地山で放置された試掘坑や長期間掘削が中断されたトンネルでは、硫黄を含む泥岩が暫くの期間露出したままの状況下になり、硫化水素が発生しやすい。すなわち、含硫黄泥岩地山で鉄分の酸化に水が加わって硫酸イオンが発生、さらに硫酸還元菌(還元バクテリア)の硫酸呼吸(嫌気性)によって硫化水素が生成される。硫化水素は空気より重いので低所に滞留する。

我が国の新第三紀層の海成泥岩には、ほぼ普遍的に硫化鉄鉱:黄鉄鉱(FeS<sub>2</sub>)が含まれていると推察される。硫黄含有の地層では地表露頭において、砂岩や泥岩の表面にしばしば黄白色の硫黄の析出が見られるから地表踏査時に留意すればある程度判る。堆積岩中の黄鉄鉱粒は一般に非常に細粒で、径0.003mmオーダーといわれてお

り (フランボイダル・パイライト), 肉眼での見分けは難しい。新第三紀層に限らず浅海成の中生層・古生層の泥質岩にも硫黄含有量として0.3-1.0重量%が普通に含まれるので, 前述したような掘削中断などの状況が発生した後は, 硫化水素のチェックを行うべきである。硫化水素は卵の腐ったような特徴ある臭いでそれと判る場合が多い。特に高濃度でない限り, 通常は十分な送風換気で危険状態を解放できる。

堆積岩中の硫黄や黄鉄鉱の起源は, 堆積時に有機物に富む海底下における還元環境で沈殿・形成される。特に内湾環境の泥底は水中酸素の循環が不良なため還元的で, 硫化水素→硫化鉄の形成に好適条件とみなされている。内湾性泥質岩の普遍的な存在として, 都市の発達している沿岸平野地下を構成する内湾性沖積層を挙げることができる。沖積層は通常数十m規模の厚さを有し, 地下鉄や地下街などトンネルや地下空間利用の対象となりやすい。その沖積層は, 最終氷期における-100m余もの海面低下と主要河川沿いの浸食によって生じた凹地が, 後氷期の海面上昇によって内湾化し, 内湾性泥質物によって埋積されて形成された。したがって, 沖積層は有機物の多い還元的環境で形成されたと言える。工事によって地表の空気にさらされると, 還元性硫化鉄の酸化作用によって多量の酸素が消費されて酸欠現象を引き起こす。ただ

し, 沖積層全体が内湾性泥層というわけではなく, 硫化鉄の僅少な陸生シルト層, 砂層の部分もあったり, 表層部は河口デルタ堆積物であって酸欠を引き起こすことはない。したがって, 掘削工事において対象とする地質をよく精査して対処すべきである。

6. 5 酸性水および重金属の溶出が予想される地山

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, 主に鉱化変質-熱水変質による。

鉱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

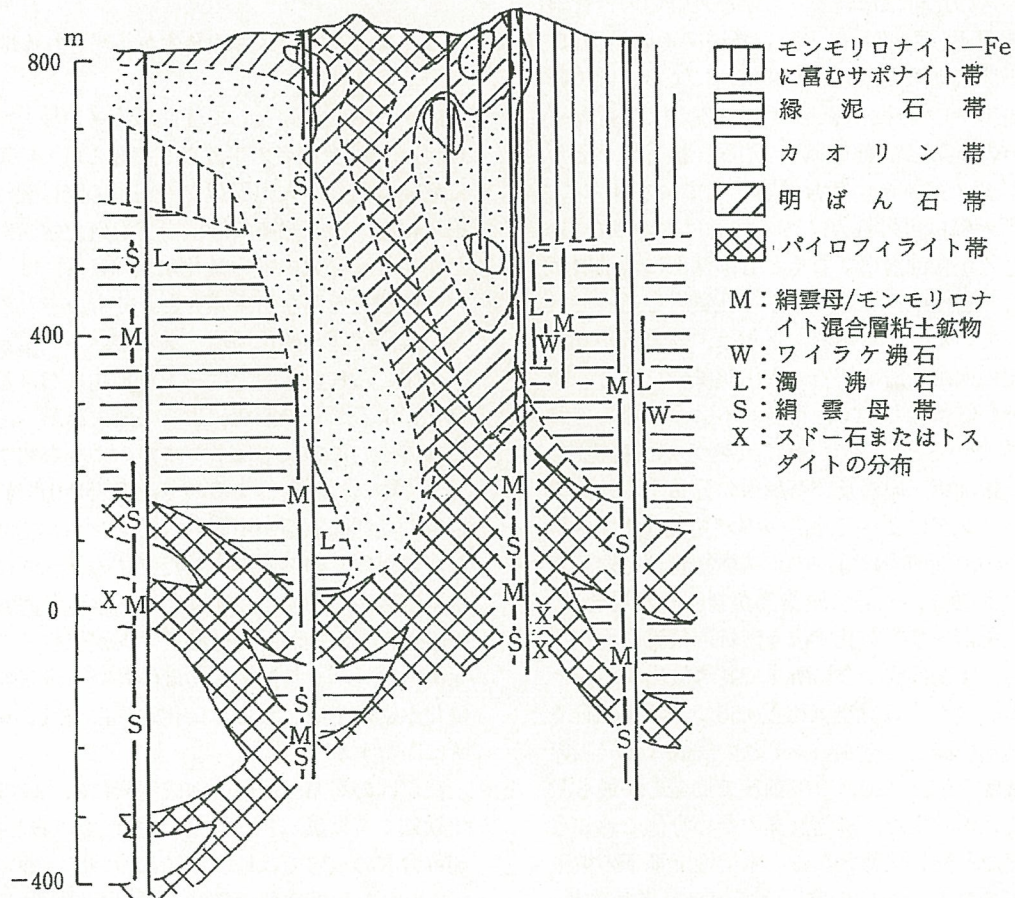


図-10 岩手県松川地熱地域における変質帯模式断面 (金原,1983<sup>43)</sup>: 島津,1991<sup>40)</sup>より転載) 縦実線はボーリング井を示す  
 Fig.10 Schematic cross section of alteration zones in the Matsukawa geothermal field, Iwate Prefecture.

化することである。熱水との反応による化学組成の変化は交代作用と呼ぶ。変質帯は典型的には、その強い部分から弱い部分に向かって変質生成鉱物の種類が系統的に変化し累帯分布を示す。これを平面的あるいは断面的に区分した「変質分帯図」の例を図-10<sup>40, 43)</sup>に示す。岩石の変質がかなり著しいと判断される場合には、現地地質踏査によってどんな変質帯がどのように分布するか概要を把握し、試料のX線回折分析などで変質鉱物の特定、変質分帯図(平面図)の作成を行い、できれば通常の地質縦断図のほかに変質分帯縦断図も用意しておきたい。

熱水変質をもたらす地下深部での熱水は、温度50~数百°C(臨界温度374°C)、流体圧0.1~100MPa以上まで、溶存成分としてナトリウム(Na)、カリ(K)、カルシウム(Ca)、塩素(Cl)など多様な成分を3~数十%まで含むといわれる。特に鉱床を生成するような熱水(鉱液又は鉱化流体と呼ぶ)は、塩素、硫黄(S)、二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)などに富み、様々な金属成分を溶解して、浸透力が強く岩石中の裂かや空隙中を移動・拡散し、母岩を変質させながら温度の低下と共に重金属の沈殿によって鉱床を生成する。熱水の起源はマグマ水ばかりでなく、地表から浸みこんだ雨水や海水などが混合していることが同位体組成の研究から判っている。熱水は母岩との反応によって、深部から浅部に向かって酸性→中性へと変化する場合もあるから、1つの地域で1つの変質タイプに限られるとは言えないし、先行する続成変質と熱水変質とが重複している場合は複雑である。一般に観察されることの多い熱水変質帯の温度は100~400°C位と推察される。

熱水には通常アルカリ元素、塩素、硫黄、二酸化炭素などいろいろな化学成分を含んでおり、表-17<sup>44)</sup>に示すように酸性・中性・アルカリ性とバリエーションがある。また、熱水の通過する周りの母岩の性質・温度によっても変質の特徴が変わる。野外で概略的に識別・表現する場合に珪化帯・セリサイト化帯・粘土化帯・カオリン帯などの変質帯区分がよく用いられる。

高度粘土化変質作用では、酸性の場合、中心部から外

表-17 熱水変質帯の区分、生成温度と溶液の化学的条件との関係<sup>44)</sup>

Table-17 Classification of hydrothermal alterations related to temperatures and chemical nature of hydrothermal solutions.

酸性変質帯	硫酸塩系	明ばん石-オパール帯			
	珪酸塩系	ハロサイト帯	カオリナイト帯	ディックサイト-ナクタイト帯	パイロフィライト帯
中性変質帯	K系	スメクタイト帯	混合層粘土鉱物帯 (イライト/スメクタイト帯) (緑泥石/スメクタイト帯)	イライト帯 (絹雲母帯)	カリ長石帯
	Ca-Mg系	スメクタイト帯	混合層粘土鉱物帯 (イライト/スメクタイト帯) (緑泥石/スメクタイト帯)	緑泥石-絹雲母帯 (プロピライト帯)	緑泥石-絹雲母-緑れん石帯
アルカリ変質帯	Ca系	東沸石帯	輝沸石帯	濁沸石帯	ワイラケ沸石帯
	Na系	モルデン沸石帯	方沸石帯	曹長石帯	
		低 ← 温度 → 高			

小 ↑  
アルカリ-アルカリ土類イオン活動度  
水素イオン活動度 ↓  
大

側に向かって、パイロフィライト(帯)-ディックサイト(帯)-カオリナイト(帯)-ハロサイト(帯)の変質鉱物の配列で特徴づけられる。時々、明ばん石・黄鉄鉱・セリサイト・石英などを伴う。鉱脈型鉱床や浅熱水性鉱床の金属鉱床に伴われることの多い変質帯でもあり、稼業鉱山の記録がなくとも、金属成分の含有に慎重な対策が求められる。しかし、より低温の変質条件下では、カオリナイト-スメクタイトが優勢となり、固結度が増して岩盤強度が増加することから、重金属などを含まなければ、変質岩なのにかえってトンネル掘削にとって良好な岩盤になっている場合もある。

セリサイト化変質は一般的に中性-アルカリ性熱水で、セリサイト・石英・黄鉄鉱で特徴づけられる。このタイプの変質帯では、単純な金銀鉱床→硫化鉱床を伴うこともある。熱水からシリカが母岩に付加される場合が多く、マグマから分離した熱水が母岩との交代作用によりシリカ(Si)を多量に溶解してSiO<sub>2</sub>飽和状態になり、上昇してより浅い部分の母岩に珪化作用をもたらすと考えられる。第三紀層のような半固結岩でこのタイプの変質作用を受けると、岩盤強度が増加してトンネルが施工しやすくなるケースがある。

いわゆるグリーンタフ地帯でよく耳にするプロピライト変質は、火山岩類がH<sub>2</sub>O及びCO<sub>2</sub>に富む熱水変質によって緑泥石・曹長石・アルバイト・炭酸塩鉱物・石英などが主に生成され、緑れん石・セリサイト・黄鉄鉱などを伴うことが多い。アルカリ性変質作用では、沸石(ゼオライト)系列の変質鉱物が代表的で、第三紀の堆積岩・火山岩類の分布地帯に見られるが、続成変質との識別が難しいこともある。東北日本を中心に西日本内帯にかけて広く点在する黒鉄鉱床は、海底噴気堆積鉱床とも呼ばれ、変質帯にもバリエーションがあるが、鉱床の中心から外側に向かって、セリサイト・緑泥石帯→イライト・スメクタイト混合帯→スメクタイト(モンモリロライト)帯→モルデン沸石のような配列が多いという。中心部が珪化の場合は珪化帯-カリ長石帯が深部を占める<sup>40)</sup>。熱水変質を被った岩石・岩盤は掘削によって空気や水分に接触すると、粘土鉱物が分解して固結度を失いボロボロになることもある。変質岩に伴う硫黄の石灰分や覆工コンクリートと反応して石膏を生成・析出させ、強い膨張をもたらすこともある。

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<sup>19)</sup>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。

これまで述べたように、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

表-18 トンネル工事における重金属類問題の調査・対策事例(45)~(49)  
 Table-18 Examples of examination and treatment on geotechnical problems  
 of mucks containing heavy metal under tunnel excavation.

名	延長	所	地質	分析値	問題点	掘削ズリ対策	トンネル排水対策
オロフレ	0.94 Km	北海道	新第三紀 火山岩 (斜長流紋 岩)	pH<3.5、溶出 pH 1.9 As:81mg/kg、0.815mg/L Fe:1200mg/L、S:2.52% 周辺地域の湧水 pH:3.5	ズリ全量処理 (91,600m <sup>3</sup> ) 有害重金属の溶出に伴う環境 汚染。 膨張性地圧。	<選別が困難なため、掘削ズリ全量を処理> 施工中:ズリ処理場(盛土)から出る強酸性水 の中和処理、および重金属沈殿除去の為の中和処 理、実績では、pHMax1.5程度まで低下 施工後:ズリを盛土に用い完全密封処理	施工中:強酸性水の中和 処理および強酸化溶出、 重金属類の沈殿除去に 必要な中和処理(処理水 は、排水基準に適合)
三豊	1.97 Km	北海道	第四紀 更新世 安山岩	褐鉄鉱床;硫化鉄鉱、硫黄、褐 鉄鉱、珪化変質、粘土化変質 環境基準を超える有害物質; 含有量 As, 溶出量 Se	掘削ズリ処理 (60万 m <sup>3</sup> 中 21万 m <sup>3</sup> が管理型ズリ処分場の予 定)、排水処理 土捨場完成後の管理	<先進ボリングによるズリ選別> ・覆土・植栽処理 ・管理型土捨場の造成により遮閉処理(遮水工 +封じ込め+水処理:ホタテ貝殻混合)	施工中:排水処理施設設 置 60t/h (凝集沈殿, p H調整, 重金属対応型)、 竣工後:モニタリング
八甲田	26.5 Km	青森県	新第三紀 堆積岩 火山岩類	S:1.0%(重量比)以上含む地 層多い。鉱脈では10:%(重量 比)以上のSを含む試料が6 割以上	ズリ処理(地山230万 m <sup>3</sup> ) 鉱山跡通過/重金属・酸性水に よる周辺河川の汚染	<岩種判定フローによるズリ選別> 「帯磁率小、簡易溶出 pH6.0以下→管理型処分場」、 「帯磁率小、簡易溶出 pH6.0以上でイオウ含有量 2.0%以上、又は重金属基準値以上→管理型処分 場」、「帯磁率大、又は帯磁率小、簡易溶出 pH6.0 以上でイオウ含有量 2.0%以下、又は重金属基準 値以下→一般型処分場」	施工中:切羽湧水、坑内 排水、放流水(濁水処理 設備処理後)、土捨場浸 出水(管理型、一般型) についてモニタリング
甲子	4.34 Km	福島県	甲子火山岩 類	溶出量:鉛、セレン (長期有害性:砒素、カドミ ウム)	重金属の溶出、酸性水による 周辺環境への影響 ズリ処理・湧水処理	二重遮水シート	実施中

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。トンネル事業の計画・調査段階で熱水変質や重金属類の存在を把握し、施工中および竣工後の管理における掘削ズリに含まれる重金属類による環境影響の抑制を計画的に実施した事例を表-18<sup>45)~49)</sup>に示す。

## 7. 不良地山のリスク低減策と地質工学的考察

山岳トンネルにおいて一般の良質地山の場合には標準設計仕様が適用されて施工されるが、不良地山の場合には、それぞれの条件に対応したリスク低減策が適用される。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一般の良質な地山条件のトンネルに比べて大きくなる。そのために、計画・設計段階で不良地山の存在が明確な場合には、不良地山の分布が少ないルートに変更することがリスクの回避策となる。地盤の力学的要因および地下水の影響による不良地山のリスクは土被りに比例して大きくなることから、土被りの小さいルートに変更することが望ましい。

ルートが変更できない場合には、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。

### 7. 1 地盤の力学的要因による不良地山

#### 7. 1. 1 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するが、支保工が巨大となり施工法を変更せざるを得ない場合もある。したがって、地山の力学的条件に適応した支保工と施工法を適切に選定することがリスク低減策となる。なお、本文では触れていないが膨張性地山は切羽の前方地山も緩み易く、その対応として切羽補強工が必要な場合が多い。

#### 7. 1. 2 塑性変形性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、地山の力学条件において地山強度比が2以下の場合に塑性変形が発生するが、内部摩擦角が30度以下の場合には著しい塑性変形を意味する膨張性地山、30度以上の場合には単なる塑性変形性地山と区分した。

したがって、塑性変形のリスクを低減するためには地山条件に適応した剛性の大きい支保工を適切に施工する方法がある。特に、切羽付近において内圧効果を早期に発揮する支保を採用することは有効と考えられる。

#### 7. 1. 3 山はねのリスク低減策

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が山はねである。したがって、山はねのリスク低減策としては坑壁部の二次応力を小さくする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施工することは効果的と考えられる。

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<sup>13)</sup>。

#### 7. 1. 4 地すべりのリスク低減策

地すべり地でのリスク低減策として、移動層や基盤岩の掘削で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が実施される。

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べきである。規模の小さい地すべりではアンカーや杭による抑止工が主体になる。規模の大きな地すべりでの現実的な対策は、押え盛土工、排土工、排水工法になるが、これらの対策に追加してトンネル坑内からの積極的な排水対策を考慮すべきである。

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く場合が多いのでトンネル覆工の剛性を高めるなどの対策と適切な排水処理工を併せて実施すべきである。

## 7. 2 地下水に関するリスク低減策

山岳トンネルの掘削において地下水に関係するリスク低減策は、基本的には地下水位を切羽前方で十分に低下することである。土被りが浅い都市NATMの場合には事前に地表から地下水位を低下している。それに対して、山岳トンネルでは土被りが大きいため、切羽より長尺探り穿孔を行い、帯水部の把握と地下水位の低下をはかる。

この時に、穿孔口より湧水とともに土砂の流出が発生した場合には、直ちに穿孔口を閉塞して別途圧力調整弁付の水抜きボーリングを行い、排水圧を調整しつつ土砂の流出を防止して地下水位を徐々に低下させることが崩壊リスクを低減する上の要点である。湧水量が多い場合や地下水位が高い場合には、水位が低下する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および水抜き坑を施工して地下水位を低下させる。

なお、海底トンネルのような水底トンネルの場合には、難透水地山区間以外の透水性地山区間に対して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。一般に、地山改良工法は確実であるが工事

費および工期が大きくなる傾向にある。

### 7. 3 地球化学的要因の不良地山のリスク低減策

地球化学的要因による不良地山は、いずれの場合もトンネル掘削にとって工事能率や安全性の低下が避けられずに、工期および工費が一般の良質地山に比較して高む。これらの不良地山の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、計画・調査段階におけるリスク回避策である。

しかし、地球化学的要因による不良地山が避けられない場合には、トンネル工事におけるリスク低減策を行う必要がある。その内、高い地熱、温泉、有害ガスに対するリスク低減策は労働安全衛生法および規則に準拠しなければならない。また、有害物を含有したトンネル排水に関しては「土壌・地下水汚染に係る調査対策指針運用基準」(平成11年1月環境庁水質保全局)を適用し、鉱化変質ズリの処理については土壌汚染対策法に準じた取り扱いがなされているのが現状である。それぞれの不良地山に対する対応策は以下のとおりである。

#### 7. 3. 1 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のトンネルにおいては、主に坑内温度を低下させるために、散水、換気などを本格的に実施するとともに作業員の健康管理に配慮する。また、火薬類の自然爆発を防止するために機械掘削および耐熱性爆薬が採用される。

#### 7. 3. 2 有害ガスを含む地山のリスク低減策

可燃性ガスが発生するおそれのある地山においては、切羽前方に長尺ガス探査ボーリングを実施して、ガス検知調査を行うとともにガスが存在する場合には、専用ガス配管に直結して坑外に直接排出する。坑内では指名した担当者が、ガス濃度測定を日常管理として実施し、基準内の濃度を確保するための換気設備などを採用する。

#### 7. 3. 3 酸性水および重金属類の溶出が予想される地山のリスク低減策

重金属類により汚染した土壌に伴う健康リスクとは、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である。掘削面として露出し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。これらのことから建設工事においては、掘削ズリの処理・処分や工事排水などに伴う環境汚染への配慮が重要である。

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必要に応じて実施し、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。

したがって、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必要がある。

### 7. 4 不良地山に関する地質工学的考察

このように山岳トンネルにおける不良地山の要因について三つに区分し、それぞれに地質工学的考察を加えて、次のように整理できた。地盤の力学的要因による不良地山として膨張性地山、中硬岩地山の塑性変形、山はねおよび地すべり地山があり、地下水の影響による不良地山として掘削作業の能率を低下させる透水性地山、および切羽崩壊を伴う湧水地山がある。地球化学的要因による不良地山として高い地熱、温泉、有害ガスなどは昔から挙げられているが、最近では環境保全の観点から鉱化変質岩に起因する酸性水および重金属類の溶出が予想される地山が加えられる。

これまで考察した各種の不良地山について図-7の岩盤の強度特性を考慮した岩種表に基づいて、岩石と岩盤状態を一覧表にしたのが表-19である。表-19によると、それぞれの岩石において土被りを含む地山の条件が揃うと不良地山となることが示されている。その岩盤の条件については、力学的な要因は4章で、湧水に関係する要因は5章で、そして地球化学的な要因は6章で述べている。

## 8. おわりに

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、我が国の工事事例に基づいて地質工学的に考察した結果、次のことが明らかとなった。

- ① 不良地山は地盤の力学的要因、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される。
- ② 地盤の力学的要因は膨張性地山、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に分けられ、それぞれの力学上の定量的条件を考察し、地山強度比が2以下で内部摩擦角が30度以下の場合には膨張性地山、内部摩擦角が30度以上の場合には塑性変形性地山と区分した。そして、岩盤の強度特性を考慮した岩種表を提案した。
- 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透水性地山と切羽崩壊が予想される地山に区分でき、地質構造および地下水状態との関係を一覧表で示した。切羽崩壊が予想され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に区分できた。

表-19 各種不良地山と岩盤状態の関係

Table-19 Relationship between difficult geotechnical conditions and states of rock

地 山 区 分		岩 盤 状 態		不 良 地 山											
		岩 石 の 硬 軟	岩 石 名	・節理・割れ 目の多少 ・空洞の有無	地盤の力学的要因				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 べ り	地 す べ り	湧水と共 に崩壊	多 量 湧 水	地 熱 ・ 温 泉	有 害 ガ ス	熱 水 ・ 鉍 化 変 質		
φ 地 山	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） 凝灰角礫岩（高強度）			割れ目少 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 地 山	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	○			○			△		△	△	△	
	土 砂	葉片状蛇紋岩、粘土質蛇紋岩			○		○							△	△
			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			○		○		△	△		△	△	○		

注) ○：関係大

△：関係あり

- ④ 透水性地山と難透水性地山についても岩盤の力学特性を考慮した岩種表を使用して区分し、地山の力学特性と透水性の関連を一つの岩種表で示した。
- ⑤ 地球化学的要因による不良地山は地熱、温泉、有害ガスおよび鉱化変質岩の地山に区分でき、それぞれの地山状態を明らかにした。
- ⑥ 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。
- ⑦ 不良地山の岩種、岩盤状態の表を考察すると全ての岩種に不良地山の条件が存在することが判明した。特に、土被りが大きい条件では多くの不良地山に関係することが明らかとなった。したがって、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リスク回避策となることがあり、経済効果が期待できる。
- ⑧ 調査・設計段階および施工段階において早期に不良地山の状態を把握でき易い一覧表を提案するとともに、それぞれのリスク低減策の要点を明示した。おわりにあたり、本文が今後のトンネル事業の安全性および経済性にささやかでも参考になれば幸いです。

#### 参 考 文 献

- 1) 土木学会(1996):トンネル標準示方書〔山岳工法編〕・同解説, pp.12~25, pp.34~39.
- 2) (社)日本道路協会(2003):道路トンネル技術基準(構造編)・同解説, pp.240~245.
- 3) 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.
- 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) 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.
- 6) 高橋彦治(1976):不良地質の予知・予測と遭遇時の対策, トンネルと地下構造物の地質調査(技術講習会テキスト), (株)土木工学社, pp.35~54.
- 7) 中村浩之(1992):トンネル坑口周辺の斜面安定と対策, 地質と調査, 第3号, pp.12~17.
- 8) 信濃川工事局(1968):上越線新清水ずい道工事誌, pp.206~209.
- 9) 下河内稔(1976):大清水トンネル万太郎谷工区的全断面工法について, 第10回岩盤力学シンポジウム, pp.101~105.
- 10) 猪間英俊(1981):関越トンネルにおける山はね, 応用地質, 22巻, 3号, pp.26~35.
- 11) 山本市治, 多賀直大(1990):3年で谷川連峰を貫く, トンネルと地下, 第21巻2号, pp.29~37.
- 12) 下河内稔, 小田重雄, 木沢恒雄(1977):大清水トンネルにおける山はね現象からの一考察, 第5回岩の力学国内シンポジウム講演集, pp.79~83.
- 13) 望月常好, 穂刈利夫, 斉藤義信, 糸田俊男(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.
- 14) 川本眺万, 石黒幸文, 呉旭(2001):山はねとその対策に関する文献調査, トンネルと地下, 第32巻7号, pp.47~56.
- 15) 大島洋志(1997):トンネル掘削に伴う地下水問題, 応用地質, 第38巻, 第5号, pp.312~323.
- 16) 木谷日出男, 小島芳之(2002):土砂地山を対象とした地山分類基準の提案, トンネルと地下, 第33巻12号, pp.41~50.
- 17) 長友茂樹, 玉川清, 政谷二三男, 原田史也(1971):山鳴りと大湧水に挑む, 恵那山トンネル中津川方, トンネルと地下, 第2巻12号, pp.43~56.
- 18) 日本トンネル技術協会(1981):トンネル工事の安全—山岳編一, pp.200~216.
- 19) 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.
- 20) 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.
- 21) テルツァギ・ベック著, 星埜和, 加藤渉, 三木五三郎, 榎並昭(1969):土質力学基礎編, 丸善(株), pp.51~93.
- 22) 星野一男, 加藤禎一(2001):本邦産岩石の深部物性データ集, 産業技術総合研究所, 地質調査総合センター速報No.23, pp.57~58.
- 23) 竹林亜夫(2003):トンネル掘削に伴う坑内変位に関する地質工学的研究, 大阪大学学位論文, pp.42~89.
- 24) 竹林亜夫, 松井保(2005):内空変位量および天端沈下量と地山条件の相関に関する考察, トンネルと地下, 第36巻11号, pp.45~54.
- 25) 後藤守, 岡崎和彦, 尾上誠一(1998):高強度吹付けコンクリートにより大土被りを克服, トンネルと地下, vol.29, No.1, pp.17~24.
- 26) 小野寺透, 吉中龍之進, 斉藤正忠, 北川隆共訳: E.フック, E.T.ブラウン共著(1985):岩



- 盤地下空洞の設計と施工, 土木工学社, pp.147~163.
- 27) 建設省関東地方建設局甲府工事事務所(1990): 雁坂トンネル施工技術検討業務委託, (財)国土開発技術研究センター, pp.29~79.
- 28) 吉田幸伸, 小林光雄, 北村俊紀, 谷卓也(2001): 小土かぶりトンネルにおける山はね現象とその対策, トンネルと地下, 第32巻5号, pp.7~17.
- 29) 東後義孝, 田中達吉, 船戸明雄, 横山幸也(1989): 神岡鉱山における地下空間開削のための岩盤調査について, 土木学会地下空間シンポジウム, pp.143~148.
- 30) 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.
- 31) 土質工学会(1982): 土質工学ハンドブック, p.69.
- 32) 吉田善亮(1982): 岩石の風化と粘土, 清水建設(株)土木技術部, p.83.
- 33) 藤沢 馨, 宮入貞徳(1983) 高熱トンネルに挑む一国道158号取入れトンネル. トンネルと地下, vol.14, No.12, pp.1011~1020.
- 34) 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一一般国道158号安房トンネル, トンネルと地下, vol.23, No.3, pp.191~198.
- 35) Harayama,S(1992): Youngest exposed granitoid pluton on Earth, *Geology*, vol.20, pp. 657~660.
- 36) 原山 智(1994): 世界一若い露出プルトンの冷却史一北アルプス滝谷花崗閃緑岩の年代と冷却モデル, 地質学論集, No.43, pp.87~97.
- 37) 阪口圭一, 高橋正明, 玉生志郎, 野田徹郎(2000): 東北・九州地熱資源図一, 東北. 工業技術院地質調査所.
- 38) 玉生志郎, 高橋正明, 村田泰章, 駒沢正夫, 金原啓司, 川村政和, 山口文春(2000): 東北日本の深部地熱資源有望地域一地熱資源図に基づいて, 地質調査所報告, No.284, pp.261~276.
- 39) 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, vol.22, No.6, pp. 443~450.
- 40) 島津光夫(1991): グリーントフの岩石学, 共立出版, p.172.
- 41) 佐藤 誠, 徳山哲也, 中筋智之, 山下武男(2000): メタン発生危険地域を極小口径シールドで掘進一東京ガス砂町運河横断工事, トンネルと地下, vol.31, No.11, pp.1029~1038.
- 42) 野崎 力, 諏訪正男(1974): 軟弱地層と爆発性ガス噴出下におけるシールド工事. トンネルと地下, vol.5, No.10, pp.898~905.
- 43) 金原啓司(1983): 八幡平東部地域における地熱変質帯と地熱系, 岩鉱, 78, pp.479~490.
- 44) 吉村尚久編著(2001): 粘土鉱物と変質作用, 地学双書, 地学団体研究会, p.293.
- 45) 原田勇雄(1989): オロフレトンネルの設計施工一鉱化変質帯におけるトンネルの施工例一, 土と基礎, vol.37, No.9, pp.101~104.
- 46) 服部修一, 蓼沼慶正, 太田岳洋(2003): 八甲田トンネルの掘削近況と鉱化ブリの管理手法, トンネルと地下, 第34巻11号, pp.7~14.
- 47) 藤井正明, 荒野広, 坪西国夫(2003): 一般国道230号復旧工事で遭遇した「重金属含有土砂の対応」について, 第47回(平成15年度)北海道開発局技術研究発表資料.
- 48) 徳富恭彦, 赤澤正彦, 長谷川利晴(2005): 八甲田トンネル鉱化変質岩に対する環境保全対策, 土木技術, 60巻第11号, pp.35~41.
- 49) 甲子トンネル下郷工区工事(福島県)(2005): 有害な掘削岩を道路に封じ込める, 日経コンストラクション, vol.2, No.11, pp.63~67.