

# 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

An engineering-geological study on instability due to water-inflow  
at tunnel cutting face

竹林亜夫<sup>1</sup>・滝沢文教<sup>1</sup>・木村正樹<sup>2</sup>・三上元弘<sup>1</sup>・奥井裕三<sup>1</sup>

Tuguo Takebayashi, Fuminori Takizawa, Masaki Kimura,  
Motohiro Mikami, and Yuzo Okui

<sup>1</sup>正会員 応用地質株式会社 技術本部 (〒331-8688 埼玉県さいたま市北区土呂町2-61-5)

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

<sup>2</sup>正会員 応用地質株式会社 関西支社 (〒532-0021 大阪市淀川区田川北2-4-66)

E-mail:kimura-masaki@oyonet.oyo.co.jp

There have occurred many difficult cases with collapses at tunnel cutting-face encountered plentiful water flow under constructing mountain-tunnel in Japan.

In this paper, mainly literatures and some author's experiences on tunneling show how to influence topography and geology of ground on inflow to be affected on influent stability at the tunnel cutting face, by means of engineering-geology. The investigation shows that problems of instability are mainly classified into three categories, that are the face flowing down in unhardened ground with water, the plentiful inflow gushing in cracky rock and the face collapsing in fracture zone by fault.

**Key Words :** water-flow, engineering-geological study, stability of cutting-faces

## 1. はじめに

山岳トンネルでは十分な事前調査ができないまま施工せざるを得ないことが多いため、掘削時に大量湧水に関する高いリスクを有する。これまでの山岳トンネル工事において、掘進中に多量湧水に遭遇した結果、難工事となった事例が多く、突発湧水の発生や湧水に伴う切羽の流動化等により切羽が崩壊すると、作業員が危険な状態に陥るだけでなく、復旧工事に多大な工費、工期を要している。そのため、未然に崩壊を防止する技術を確認することが望まれるが、湧水による切羽の不安定化問題については、これまで部分的な研究しか見られない。本報文においては、これまでのトンネル工事例を文献調査することにより、湧水量と関係が深い地形・地質条件と湧水に伴う切羽の安定性との関係について検討し、湧水リスクの低減対策についての目安を得ることを試みたので報告する。

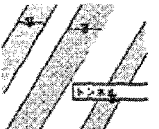
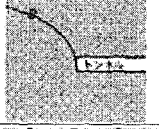
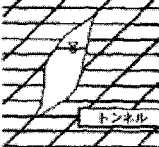
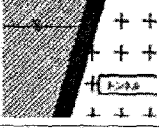
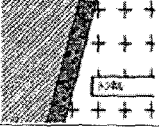
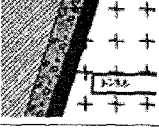
## 2. 湧水による切羽の不安定化現象の分類

トンネル掘削時の湧水量ならびに恒常湧水量は主に地形・地質条件に起因することから、我が国のこれまでのトンネル工事例を主に文献調査し、湧水による切羽の不安定化現象について整理を行った。

湧水により切羽が不安定化する形態について、地質条件および切羽の崩壊形態に基づき、以下の3パターンに分類した。

- ①含水未固結地山における土砂の流動化現象を引き起こす湧水：第三紀鮮新世から第四紀更新世の砂層・砂礫層、花崗岩強風帯(マサ土)、未固結火山噴出物等
- ②岩盤の割れ目や空洞に賦存した地下水の突発的湧水による切羽崩壊：花崗岩・ホルンフェルス・片岩等の硬岩・中硬岩、安山岩等の火山岩類の貫入岩体等の割れ目が多い岩盤、石灰岩・溶岩等の空洞等

表-1 地質条件によるトンネル湧水の分類<sup>1)</sup>

| 地質条件 |                      |              | 地質モデル                                                                               | トンネル湧水現象                                                                                  | トンネル対策工法                                                                                                | トンネル<br>施工事例                                                                                                 |
|------|----------------------|--------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 地層水  | 未固結帯水層               | 水平層<br>～緩傾斜層 |    | <ul style="list-style-type: none"> <li>・わずかな湧水とともに切羽崩壊</li> <li>・切羽崩壊後に地表沈下・陥没</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>・地表からディープウェル、薬液注入</li> <li>・坑内よりウェルポイント、水抜きボーリング、薬液注入</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>・習志野台T</li> <li>・国分川分水路T</li> <li>・帷子川分水路T</li> <li>・生田T</li> </ul> 他 |
|      |                      | 難透水層との互層     |    | <ul style="list-style-type: none"> <li>・難透水層の割れ目より湧水</li> <li>・突発湧水と共に切羽崩壊</li> </ul>     | <ul style="list-style-type: none"> <li>・水平水抜きボーリング</li> <li>・水抜き坑</li> <li>・薬液注入</li> </ul>             | <ul style="list-style-type: none"> <li>・浦佐T</li> <li>・堀之内T</li> <li>・信発導水路T</li> </ul> 他                     |
|      |                      | 帯水層が不整合で分布   |    | <ul style="list-style-type: none"> <li>・多量の湧水と共に土石流状崩壊</li> <li>・湧水と共に山鳴り現象</li> </ul>    | <ul style="list-style-type: none"> <li>・水平水抜きボーリング</li> <li>・水抜き坑</li> <li>・薬液注入</li> </ul>             | <ul style="list-style-type: none"> <li>・安房T</li> <li>・中山T</li> <li>・加久藤T</li> <li>・第2串内T</li> </ul> 他        |
|      | 固結帯水層                |              |    | <ul style="list-style-type: none"> <li>・崩壊現象がなく、切羽、坑壁より常時湧水</li> </ul>                    | <ul style="list-style-type: none"> <li>・特になし</li> </ul>                                                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>・大船送水T</li> <li>・榛名T</li> </ul> 他                                     |
| 洞窟水  | 溶融（カルスト）地下空洞の貯水<br>他 |              |   | <ul style="list-style-type: none"> <li>・切羽の割れ目より集中湧水</li> <li>・発破後突発湧水で切羽崩壊</li> </ul>    | <ul style="list-style-type: none"> <li>・先行水抜きボーリング</li> <li>・さぐりノミ</li> <li>・空洞充填グラウト</li> </ul>        | <ul style="list-style-type: none"> <li>・肥後T</li> <li>・叶山T</li> </ul> 他                                       |
|      | 貫入岩による割れ目岩盤          |              |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>・貫入岩の前後で突発湧水</li> <li>・時には切羽崩壊</li> </ul>          | <ul style="list-style-type: none"> <li>・水平水抜きボーリング</li> <li>・水抜き坑</li> <li>・薬液注入</li> </ul>             | <ul style="list-style-type: none"> <li>・塩尻T</li> <li>・青函T</li> <li>・蔵王T</li> </ul> 他                         |
| 裂か水  | 割れ目の多い岩盤             |              |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>・時に切羽で集中湧水</li> <li>・粘土目で崩落</li> </ul>             | <ul style="list-style-type: none"> <li>・水平水抜きボーリング</li> </ul>                                           | <ul style="list-style-type: none"> <li>・紫尾山T</li> <li>・雁坂T</li> <li>・葛野川導水路T</li> <li>・福岡T</li> </ul> 他      |
|      | 粘土質破碎帯               |              |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>・破碎帯突破直後に突発湧水</li> <li>・時に切羽崩壊</li> </ul>          | <ul style="list-style-type: none"> <li>・水平水抜きボーリング</li> <li>・水抜き坑</li> <li>・薬液注入</li> </ul>             | <ul style="list-style-type: none"> <li>・籠坂T</li> <li>・恵那山T</li> <li>・日足T</li> <li>・新神戸T</li> </ul> 他         |
| 破碎帯水 | 帯水層を有する破碎帯           |              |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>・切羽の割れ目より多量湧水</li> <li>・時には破碎帯の土砂流出</li> </ul>     | <ul style="list-style-type: none"> <li>・水平水抜きボーリング</li> <li>・水抜き坑</li> <li>・薬液注入</li> </ul>             | <ul style="list-style-type: none"> <li>・六甲T</li> <li>・大町T</li> <li>・清水T</li> <li>・蔵王T</li> </ul> 他           |
|      | 変質粘土帯と帯水層を有する破碎帯     |              |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>・礫混じり土の押し出し崩壊</li> <li>・湧水と共に山鳴り現象</li> </ul>      | <ul style="list-style-type: none"> <li>・水平水抜きボーリング</li> <li>・水抜き坑</li> <li>・薬液注入</li> </ul>             | <ul style="list-style-type: none"> <li>・恵那山T</li> <li>・丹那T</li> <li>・青函T</li> <li>・関門T</li> </ul> 他          |

③断層破碎帯での突発的湧水による切羽崩壊 :  
粘土質難透水路 (断層粘土等) の背後の帯水路 (破碎帯等)

これらの地質条件に併せて地質構造を考慮し、表-1のようにトンネル湧水現象を整理した。同表には、我が国の大量湧水を伴ったトンネルの例とそれぞれの主な対策工法も示した。

未固結含水層には水平層から緩傾斜、難透水路との互層および未固結火山噴出物等が不整合で分布する場合がある。それぞれ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る。

節理・および割れ目に起因する湧水に係するものには、火山岩類等の貫入によるものと、硬質・中硬質岩の節理および割れ目がある。

断層破碎帯には破碎帯全体が粘土質の場合と礫質で帯水路となっている場合および粘土質部分と礫質部分を合わせた場合が存在する。

切羽で多量湧水の可能性が大きい地質条件は、含水未固結地山、透水係数の大きい固結帯水路、洞窟水、裂か水、断層破碎帯等である。

以上の分類を踏まえ、地質別に湧水と切羽崩壊現象との関係を考察する。

### 3. トンネル湧水と切羽不安定化に関する地質学的考察

#### (1) 含水未固結地山における切羽流動化

##### a) 土砂の流動化が発生した切羽の土質性状

山岳トンネルで問題となる未固結層は、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層であり、これらの地層で切羽が地下水位以下に位置し、地下水位を低下できない場合に、わずかな湧水と共に土砂が流動化して徐々に崩壊することがある。

含水未固結地山において、湧水に伴い土砂が流動化する現象の要因は、未固結状態の土質性状、切羽付近の地下水位と動水勾配および施工方法が複雑に影響していると考えられる。

切羽において土砂の流動化が発生した主な工事例としては、北陸本線の浦本トンネル<sup>2)</sup>、武蔵野南線の生田トンネル<sup>3)</sup>、信濃川水路トンネル<sup>4)</sup>、上越新幹線堀之内トンネル<sup>5)</sup>等がある。

浦本トンネルならびに堀之内トンネルにおいては

表-2 切羽が流動した箇所と自立した箇所の土質性状 (砂層、砂礫層の場合)

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

施工時に土質試験を実施しており、土砂の流動化を生じた箇所と自立した箇所に分けて整理した土質性状を表-2に示す。

この表より、切羽が流動化した場合の砂層は締まりの弱い状態であり、切羽が自立した箇所は締まった砂層であることがわかる。なお、両トンネルの地下水位は 1N/mm<sup>2</sup> 以下の状態であった。

また、浦本トンネルにおいて、切羽が流動化した箇所の相対密度は 0.8 以下であり、切羽が自立した箇所は相対密度が 0.8 以上の締まった砂層であった。

##### b) 土砂の流動化と動水勾配の関係

未固結地山においては、トンネル切羽周辺の動水勾配が限界動水勾配を上回る場合、パイピングやボーリング現象が発生する。

限界動水勾配は、下記のテルツァギの式で求めることができる。

$$I_c = \frac{G_s - 1}{1 + e} \quad (1)$$

ここに、 $I_c$ : 限界動水勾配、 $G_s$ : 土粒子の比重、 $e$ : 間隙比

浦本トンネルならびに堀之内トンネルにおいて、切羽が流動化した土質の限界動水勾配は概ね 1.06 以下であるのに対し、切羽が自立した土質の限界動水勾配は 1.06 以上であった。

しかし、一般には切羽付近における地下水位や動水勾配の分布を計測するのは困難である。

動水勾配を推定する方法としては、地山の透水係数と地下水位を仮定した上で、図-1のような浸透流解析によりトンネル周辺地山の地下水位低下曲線を求める方法がある。同図より、トンネル周辺の動水勾配は、透水係数が  $10^{-3}$  cm/sec の場合は概ね 1 以下、 $10^{-5}$  cm/sec では 1~2 程度、透水係数が更に小さくなるとトンネル周辺地山の動水勾配は大きくなる傾向にある。実際には、透水係数が  $10^{-5}$  cm/sec 以上の未固結地山においては、粘土分が多く自立しやすいと考えられるため、透水係数が  $10^{-4}$  cm/sec 程度の地山が最も流動化が発生しやすいと考えられる。

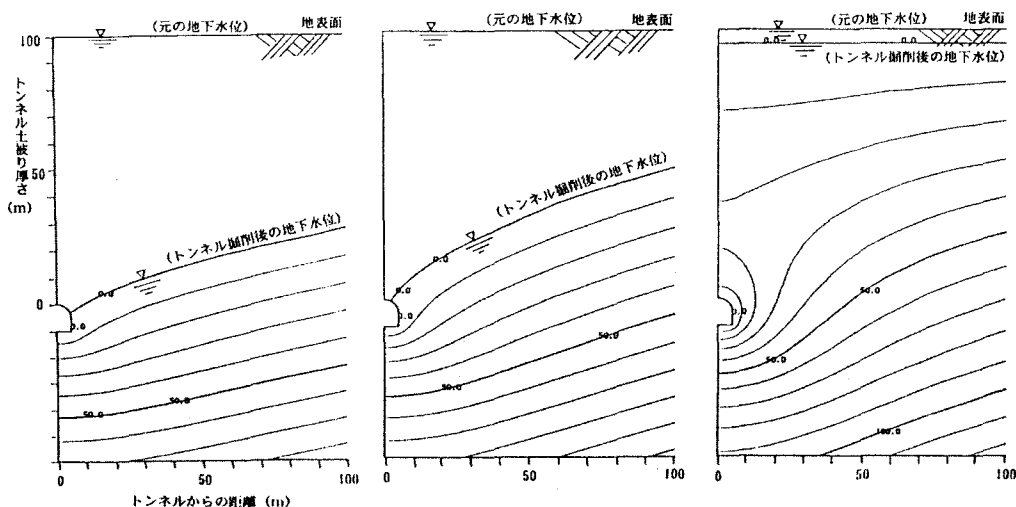


図-1 地山の透水係数とトンネル掘削後の坑内湧水量および地下水位低下状態<sup>24)</sup>

### c) 含水未固結層と難透水層との互層地山

泥岩層等の難透水層との互層地山において切羽崩壊が発生するケースがあるが、これは水平ボーリング等で濁水状の土砂が流出すると切羽前方地山に含水ゆるみ域（ボーリング現象）を誘発して、その結果未固結地山に含水ゆるみ域が生じ、その液体状土塊が掘進により薄くなったカバロックを破壊し崩壊することが考えられる（図-2①）。特に水平水

抜きボーリング孔は流出土砂によって閉塞し易いために、追加ボーリングを行うことで流出土量が増加して含水ゆるみ域も増加することがある。

また、図-2②のように、水平ボーリングを行わないでトンネル切羽が未固結含水砂層に接近する場合、カバロックの強度がある間は節理等の割れ目から清水状態で排水できるが、掘進によりカバロックが薄くなると湧水が濁水状となって砂層内に含水ゆるみ域が徐々に形成され、突然カバロックが破壊されて土砂が急激に流出し、切羽崩壊に至ることがある<sup>7)</sup>。

このように含水未固結層においてボーリング等で土砂の流動化を生じる砂層は、地下水圧が  $1 \text{ N/mm}^2$  以下の場合で、乾燥単位重量が  $15.1 \sim 17.5 \text{ kN/m}^3$  と締めりの弱い状態であり、ボーリング等で濁水状の土砂を流出させて生じる含水ゆるみ域の土質状態も同様と考えられる。

このような切羽崩壊形態はトンネル作業において最も危険な状態であり、未然に防止する必要がある。

含水未固結火山噴出物が堆積している地山でも崩壊形態は同じであるので注意する必要がある。

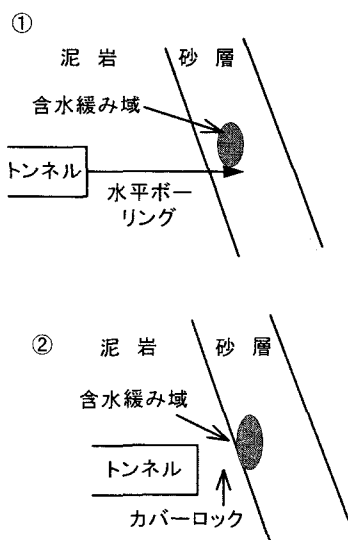


図-2 含水未固結層の崩壊過程

### (2) 岩盤の割れ目や空洞からの多量湧水

トンネル掘削時に切羽が自立していても、岩盤の割れ目および空洞より毎分約  $0.3 \sim 0.5 \text{ m}^3$  以上の湧水がある場合には、吹付けコンクリートとロックボ

ルトの施工時にコンクリートおよびモルタルが付着できずに流失して作業が著しく困難になり、切羽が不安定になることがある。また、高い水圧を伴った湧水においては、穿孔時に水圧により削岩機とともに飛ばされたり、ボーリングのロッドの脱着時にロッドが飛ばされて危険な場合が生じることもある。

このような岩盤の割れ目および空洞による切羽部の多量湧水、高圧湧水の形態には、次の2つのパターンが考えられる。

- ①硬質岩で切羽が自立していて、割れ目、節理および空洞より湧水する。
- ②帯水層、帯水部が存在し、事前の水抜き対応ができなかった場合には突発湧水とともに切羽が崩壊する。

割れ目の多い地山や洞窟等の空洞が存在する地山では、土被りが大きくなるほど湧水量も多くなるが、割れ目に介在する粘土にも影響される。例えば、山陽新幹線の福岡トンネルの西工区は割れ目が少ない良質地山（古生代の三郡変成岩地山）で、トンネル湧水量は0.35 t/min/kmであったが、東工区は同じ岩質で土被りもほぼ同じ（200m）であったが、粘土を介在しない割れ目が多いためにトンネル湧水量

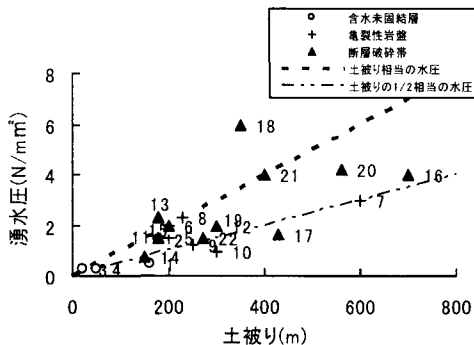


図-3 土被りと湧水圧の関係

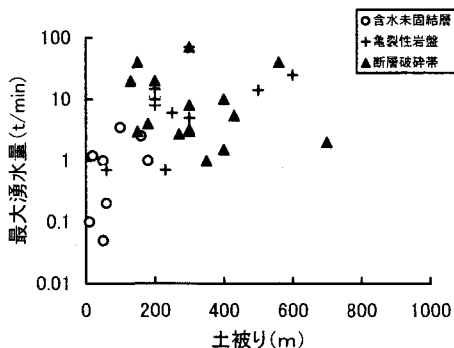


図-4 土被りと最大湧水量の関係

は11.5 t/min/kmと異常に多い状態であった。

図-3、図-4に示すように、土被りが大きくなると共に地下水圧が大きくなり、湧水量も多量になる。これに対し、土被りが大きくなると事前の地質情報は不確実になる傾向にある。帯水層や帯水した空洞などの湧水危険区間を地質調査資料と類似施工事例より予測することは極めて重要であり、水抜きボーリング等の実施と慎重な掘進によって安全に施工できた事例も多い。したがってトンネル湧水リスクを低減する第一段階は、帯水区間等の地質構造を把握することである。

### (3) 断層破碎帯における突発湧水

トンネル掘削時に粘土を介在する断層破碎帯に遭遇すると、遮水層となる粘土層の被りが薄くなった時に、多量湧水を伴った切羽崩壊が発生することがある。

崩壊土量は、湧水量、湧水圧、切羽断面積、帯水部の岩盤の自立性および遮水粘土の厚さ、強度等が複雑に関係していると考えられ、特に断面積が大きい本坑切羽が崩壊した場合には流出土量は大きくなる傾向にある。

我が国のトンネル工事において遭遇した、切羽崩壊を伴う湧水に関する断層破碎帯主に次のような種類がある。

- ① 断層破碎帯の全体が粘土化して難透水性の場合
- ② 断層破碎帯の全体が砂礫質で透水性が大きい場合
- ③ 断層破碎帯の一部が粘土化して難透水性となっており、残りが砂礫質等の場合

このような断層破碎帯の形状によって、帯水部と遮水部が形成され、地下水圧と透水係数が関係して、多種多様なトンネル湧水形態が現象する。

①の断層破碎帯全体が粘土質の場合は、恵那山T（長平沢断層）等の事例があり、地山の力学的強度が弱いためにトンネル周辺地山に塑性域が発生し、切羽の自立性不足と支保の変形問題が顕著となることがある。

②の場合は断層に接近すると恵那山T（白が久保断層）等のように高水圧で多量湧水に遭遇して、突発的に切羽崩壊を発生し、危険な状態になることがある。このような崩壊の要因は、水平ボーリングおよび切羽での部分的な湧水により破碎帯の帯水部に含水ゆるみ域を形成し、難透水の断層破碎帯の粘土部が自立できなくなると崩壊する。この場合、地下水圧が大きい程崩壊は急激で、また、破碎帯の含水

未固結厚さが大きい程崩壊土量は大きくなる。

③の場合は、徐々に湧水量が増加しつつ部分的に崩壊を繰り返す切羽崩壊が発生する。特に、断層の一部が粘土化している遮水部は、地山の強度が弱くかつ内部摩擦角が小さいために、トンネル掘削の影響により塑性化したところに、切羽前方の帯水部の水压等が作用することにより、切羽が徐々に、あるいは急激に崩壊することになる。

このような断層破碎帯における突発湧水に類似した現象が、難透水性の変質帯を伴った火山岩分布域でも発生するので注意を要する。

## 4. リスクの低減対策

### (1) 調査段階における予測

トンネル施工時の湧水問題は、地盤工学的には地山の透水性と帯水状態および地下水位に関係している。地山の透水性については地質構造に伴う透水部と難透水部の空間的分布状態を調査段階で把握する必要がある。

切羽での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シミュレーション手法等、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調査を十分に行い難いために、十分な解析の精度を得られないのが現状である。このことから、現段階ではトンネル湧水量を正確に予測することが問題でなく、集中湧水的位置を地質工学的手法等で予測することが現実の問題でもあるといわれている<sup>9)</sup>。

湧水的位置を予測する地質工学的方法は、地質踏査、弾性波探査、電気探査、ボーリング調査が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。しかし、多量湧水が発生する可能性のある土被り 200m 以上の位置ではボーリング調査は行われないことが多く、物理探査だけでは軟質部や破碎質および帯水部等を正確に把握するのは難しい。したがって、地質踏査において切羽の湧水リスクに関係する地質要因を綿密に観察することが重要であり、問題箇所の存在が予想される場合には、その分布状態を精査する必要がある。

施工段階では湧水が予測される位置の手前で掘削を一時停止し、先進水平ボーリング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な方法が普及しつつある。

### (2) 土砂の流動化リスクの低減対策

山岳トンネルにおいて土砂の流動化リスクを有する地質条件は第三紀鮮新統から第四紀更新統に堆積した含水未固結シルト、砂層、砂礫層、シラス層および火山噴出物堆積層である。その内、砂層の場合については、地下水位が  $1 \text{ N/mm}^2$  以下の条件では、乾燥単位体積重量で  $17.5 \text{ kN/m}^3$  以下、間隙比で 0.45 以上の締まりのゆるい砂層の場合に土砂の流動化のリスクが高くなる。ただし、この数値は地下水位が  $1 \text{ N/mm}^2$  以下の場合であり、それよりも地下水位が大きい場合には土の乾燥単位体積重量がさらに大きくなると考えられる。

限界動水勾配は砂層の間隙比から式 (1) より求められる。一般的に、山岳トンネルは土被りの厚い箇所を掘削するために、切羽周辺の動水勾配を計測することは不可能の場合が多いので、あらかじめ浸透流解析で透水係数を変化させた地下水位低下曲線を算定しておいて、切羽の地質観察結果から透水係数を推定して動水勾配を求める方法が考えられる。土砂流動を生じる地山の透水係数は一般的に  $1 \times 10^{-4} \text{ cm/sec}$  前後の場合が多く、その場合の動水勾配は 1 以上と考えられ、限界動水勾配を越えることが考えられ、土砂流動のリスクが高くなる。

土被りが非常に大きく、地下水位が大きい場合には、動水勾配も大きく水平ボーリング時の湧水量も多いことから、締まりのゆるい未固結層のみならずやや締まった未固結層でも土砂の流動化のリスクは高いと考えられる。

切羽の流動化リスクを評価する方法として、地質調査段階および施工時に先行水平ボーリングを行い、濁水状態および土砂の流出状況を観察することによって土砂の流動化を判定する方法が直接的かつ現実的であり、ここに提案する。この際、土砂の流動化が予想される場合のボーリングにおいては圧力調整弁を設備し、流動化を誘発した時には直ちに排水圧力を調整して、流動化を抑制することが大切である。

また、水平ボーリングにおいては、土砂の流動化に関する判定を行うと同時に地下水位の低下効果が期待できる。

### (3) 多量湧水リスクの低減策

切羽で多量湧水の可能性が大きい地質条件は、割れ目が発達し透水係数の大きい固結帯水層、洞窟水、裂か水、断層破碎帯および火山性噴出物で粘土質の遮水部が無い場合等である。

新鮮で割れ目の少ない砂岩、頁岩、結晶片岩、片麻岩、石灰岩、花崗岩の透水係数は概ね  $10^{-6} \text{ cm/sec}$

以下の難透水性である。しかし、これらの岩種でも割れ目が多いと透水性となり、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湧水に関係する地下水の賦存量は小さい。

地山内の割れ目に粘土が介在する岩種は、岩石の風化特性に関係すると考えられる。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、凝灰岩および安山岩、玄武岩、片麻岩、結晶片岩の一部が該当すると考えられる。

割れ目が密着したり、粘土を介在する岩種は、コアの圧縮試験において延性破壊の形状を呈する性質を示し、いわゆるc地山に該当する。それに対して、試験において脆性破壊を呈する岩種はいわゆるφ地山に該当し、割れ目に粘土を介在し難く、側圧が小さい場合には開口亀裂になり易い。これらの岩種毎の地山の透水性の傾向は表一3に示すとおり整理できる。すなわち透水係数が大きい地山はφ地山の硬質・中硬質岩の内割れ目の多い場合と土砂地山およびc地山の中硬質岩の新鮮岩と考えている。それに対して、透水係数の小さい地山はφ地山の割れ目の少ない地山とc地山の軟質岩・破碎変質岩および中硬質岩の割れ目に粘土を介在した地山である。

著者等は、トンネルの坑内変位に関する研究<sup>8)</sup>で、岩種をc地山とφ地山の分類を表一4のように提案

している。同表は坑内変位を考慮した岩種分類であるが、表一3の地山の透水性を考慮するとトンネルの設計・施工において、地山の変位挙動と湧水現象を一つの岩種分類で次のように説明できる。

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質岩、硬質岩とc地山の新鮮で割れ目の多い中硬質岩と石灰岩の空洞等で、トンネル掘削時には湧水が多い。また、これらの岩質はトンネル掘削時の内空変位は小さく、破碎変質岩と土砂地山では天端沈下対策は必要であるが、他の岩種の地山は天端沈下量も少ない。

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質岩から硬質岩で、トンネル掘削時には湧水量は少ない。また、全てのc地山において地山強度比が1以下の条件ではトンネル掘削時の内空変位と天端沈下量すなわち坑内変位量は大きくなり、切羽の塑性域も大きい。

このように、透水性と難透水性に着目した岩種分類は、坑内変位を考慮した岩種分類を使用して説明でき、これを用いてトンネル掘削時の坑内変位挙動と湧水現象を予測することができる。

前述のように、割れ目、節理、空洞性地山においては地下水圧も考慮した上で、地質工学的に湧水箇所を予測することが最初に必要となる。湧水箇所を予測できれば、その手前までトンネル掘削を行い、水平ボーリングで湧水状況の調査と排水を兼ねることが現実的である。現地条件によって地下水位を低下できない場合には、湧水調査後に止水を目的とした地盤改良工法を採用する。

#### (4) 断層破碎帯の崩壊防止対策について

断層破碎帯および変質帯を含む火山岩地山のトンネル掘削において湧水に伴って切羽が崩壊するのは、

表一3 c地山、φ地山における透水係数

| 岩種状態 |           |      | 透水係数大<br>(透水層) | 透水係数小<br>(難透水層) |
|------|-----------|------|----------------|-----------------|
| φ地山  | 硬質・中硬質岩   | 割目少  |                | ◎               |
|      |           | 割目多  | ◎              |                 |
|      | 土砂        |      | ◎              |                 |
| c地山  | 中硬質岩      | 新鮮岩  | ○              |                 |
|      |           | 粘土介在 |                | ○               |
|      | 軟質岩・破碎変質岩 |      |                | ◎               |

表一4 坑内変位と湧水を考慮した岩種分類

|     | S (破碎・変質岩と土砂)                                           | L (軟質岩)                           | M (中硬質岩)                                                          | H (硬質岩)                                       |
|-----|---------------------------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| φ地山 | S-a<br>φ地山の各種岩石の破碎変質の内、粘土化していない場合および第四紀の砂層、礫層           |                                   | 安山岩、玄武岩、石英安山岩、流紋岩、ひん岩、礫岩、砂岩(第三紀層)、蛇紋岩(塊状)、砂質片岩、砂質凝灰岩・凝灰角礫岩(高～中強度) | 花崗岩類、ホルンフェルス、片麻岩、斑れい岩、石灰岩、角閃石岩、チャート、砂岩(中古生層)等 |
| c地山 | S-b<br>c地山の破碎・変質したものおよびφ地山で破碎・変質して粘土化したものと、第四紀のシルト、粘性土層 | 凝灰岩(低強度)、蛇紋岩(葉片状)、千枚岩、泥岩、頁岩(第三紀層) | 粘板岩、泥質片岩、頁岩(中古生層)、                                                |                                               |

粘土が存在する場合が多い。一旦切羽崩壊が生じると、空洞および崩壊した部分を地盤改良して自立性が確保できる状態にしなければ掘削できないため、トンネル掘削を再開する迄に数ヶ月を要することになり、工費が高み、工期も延長せざるを得なくなる。したがって崩壊を未然に防止する技術の確立が望まれる。

断層破碎帯で崩壊するケースの共通点は、粘土を含む遮水帯の前方に礫状の破碎帯等の帯水部が存在していることである。この粘土を含む遮水帯は、表-4ではc地山の破碎変質岩で、トンネル施工時の坑内変位が大きい岩種であり、切羽前方のゆるみ範囲も大きいと考えられ、さらに帯水部の水圧等が作用することにより、切羽が徐々に、あるいは急激に崩壊している。NATMではショートベンチカット等で、比較的大きい断面で掘削するために、切羽崩壊時の崩壊土量は大きい傾向にある。このようなリスクを低減するには、断層破碎帯等の帯水部の位置と湧水状態を事前に確認して、地下水位低下工法等の補助工法を事前に採用することである。

すなわち、調査段階で切羽崩壊リスクを伴う断層破碎帯および不整合面等の把握に努めると共に、それらの存在が予想される場合には、追加調査で確認する必要がある、その結果を設計に反映することが大切である。施工中の切羽の一部に破碎帯の粘土部が出現したり、穿孔時に切羽前方に粘土部の存在を確認した時には、直ちに掘削を停止して長尺穿孔およびボーリングで切羽前方地山の地質調査を行なうことは、大規模崩壊を防止するための要点でもある。

断層破碎帯にボーリングおよび水抜き坑を掘削する時に、含水未固結地山で考察したように地山内に含水ゆるみ域を形成しないように配慮する必要がある。特に、本坑掘削域付近に含水ゆるみ域が形成されると、切羽崩壊の原因になるので、事前に地盤改良を行う必要がある。

このように断層破碎帯部の施工は、含水未固結地山と同様にゆるみ易く、崩壊し易い地山の状態で、丁寧に地下水圧だけを低下する必要があるために、焦らずに確実な水抜き施工を行うことが肝要である。

## 5. まとめ

湧水によるトンネル切羽の不安定化現象について、我が国のトンネル施工事例を地質工学的に考察を行い、次のことを明確にした。

- ① 切羽が崩壊すると、危険な状態に陥るだけで

なく、復旧工事に工費、工期が高むために、未然に崩壊を防止する技術の確立が望まれる。

- ② 湧水によるトンネル切羽の不安定化は、含水未固結層の土砂の流動化、多量湧水、断層破碎帯等による切羽崩壊の三つに区分して、それぞれの地質、土質性状を明らかにした。
- ③ トンネル切羽の不安定化をもたらす特殊な地質条件をトンネル湧水の形態で分類し、地山を構成する地質構造と地下水圧に関係していることを明らかにした。
- ④ 地山を構成する各種岩石の成因と性状を分析することにより、地下水を帯水し易くて透水性のある岩種と、難透水性の岩種を区分した。
- ⑤ この透水性と難透水性の岩種分類は、坑内変位を考慮した岩種分類でもあり、それを用いて、トンネル掘削時の坑内変位挙動と湧水現象を予測することが出来ることを提案した。
- ⑥ トンネルの湧水リスクを低減する現実的で確実な方法は、地質構造を把握して、湧水予測箇所の手前で切羽を止めて、長尺水平ボーリングを行なうことで、その際には土砂の流出防止に配慮する必要がある。

## 参考文献

- 1) 竹林亜夫・滝沢文教・木村正樹：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, pp19~54, 2003.
- 2) 北陸本線糸魚川～直江津間線路増設工事誌：日本国有鉄道岐阜工事区, pp. 176~191, 1969
- 3) 森藤真治：稲城砂層に挑む大断面トンネル、トンネルと地下、第4巻5号, pp. 25~31, 1973
- 4) 木谷日出男、小島芳之：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, 2002
- 5) 竹林亜夫、水谷文俊：被圧滞水層におけるトンネル切羽の安定性の評価について、第7回岩の力学国内シンポジウム, pp. 361~366, 1987
- 6) 大島洋志：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, 1997
- 7) 日本国有鉄道岐阜工事局：北陸本線糸魚川・直江津間線路増設工事誌, pp. 152~190, 1969
- 8) 竹林亜夫、三上元弘、国村省吾、奥井裕三、呉旭：地山の内部摩擦角に着目したトンネルの岩盤分類の提案、土木学会年次講演会、VI-05, 2003