

# 山岳トンネルの施工中における 集中湧水リスク評価のための事例分析

金沢 淳<sup>1\*</sup>・倉橋 稔幸<sup>1</sup>・佐々木 靖人<sup>1</sup>

<sup>1</sup>独立行政法人 土木研究所 材料地盤研究グループ 地質チーム（〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6）  
\*E-mail: s-kana44@pwri.go.jp

本報告では、山岳トンネル工事中における地質状況や地下水状況に起因する工事トラブルが発生した644事例を収集した。そのうち、61事例について水抜き工の内容と集中湧水リスクの回避・低減効果との関係を分析した。その結果、集中湧水の発生前に先進ボーリングを実施したにもかかわらずリスクの低減効果が低かった事例が見受けられ、その原因が、地質・地下水情報の取得不足に伴う解釈の不確実性や、地山の透水性状の不均質性等に伴い水抜き不十分となることを明らかにした。

**Key Words :** mountain tunnel, geological risk, water inrush, advance borehole

## 1. はじめに

山岳トンネル工事の事前調査においては、調査結果の不確実性に伴う設計と施工での乖離が大きいことが知られている。このような地質調査結果の不確実性とそれに起因する事業コスト損失は、近年では「地質リスク」として認識されており<sup>1)</sup>、山岳トンネル施工中における集中湧水の発生可能性も一つの地質リスクである（以後、集中湧水リスクとする）。

集中湧水リスクの素因となる地質・地下水条件については竹林ほか(2003)<sup>2)</sup>により整理されている。また、施工中におけるリスクの回避・低減策として、先進ボーリング工等の水抜き工が切羽前方探査と水抜き孔としての役割を併せ持つ方法として用いられている<sup>3,4)</sup>。しかしながら、水抜き工を先行させたことによる集中湧水リスクの回避・低減効果に関する分析は個別報告に留まっている。そこで本報告では、水抜き工を先行させた記載のある61事例を対象に水抜き工の内容と集中湧水リスクの回避・低減効果との関係を分析した。

## 2. 分析方法

山岳トンネルの施工中において地質リスクが発現した事例を対象として文献調査を実施し、421トンネルの644事例を収集した。このうち、集中湧水リスクが発現した事例は180件あり、28%の割合を占めた（図-1）。180事

例のうち水抜き工を先行させた記載のある61事例を対象に、水抜き工の内容とリスクの回避・低減効果との関係を分析した。

さらに、水抜き工を実施しても排水効果の低かった25事例のうち、先進ボーリング工を実施したがボーリング孔からの排水量が少なかった14事例を対象として素因（地質・地下水条件）、誘因（施工中の状況判断等）と事例との関係を分析した。

なお、水抜き効果の判断の目安として本坑において切羽崩壊等の変状の発生や水抜き坑の追加が必要でなかった場合を「高い」とし、その逆の場合を「低い」とした。

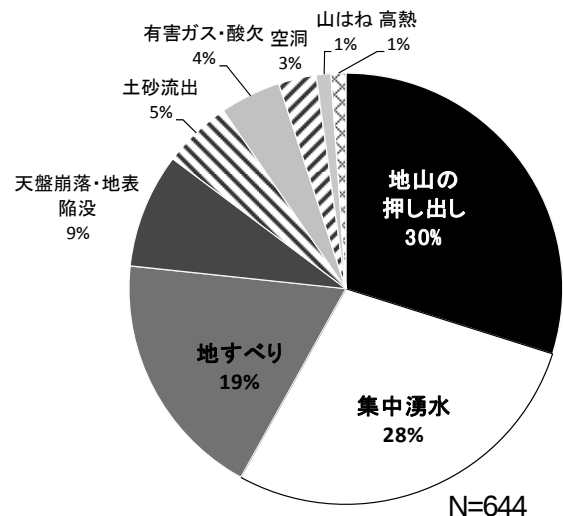


図-1 山岳トンネル工事における地質リスク事象別の割合

### 3. 分析結果

#### (1) 水抜き工の内容と集中湧水リスク回避・低減効果

集中湧水リスクを回避・低減させるために水抜き工を先行して実施した記載のある61事例を対象に工法の内訳とその効果を分析した。まず、水抜き工には避難坑の先行掘削、先進導坑掘削、先進ボーリング掘削が知られており、その内容別の実施状況を図-2に整理した。その結果、「先進ボーリング」が53件と最も多用されており、単独で用いられた事例が31件、避難坑や先進導坑と組合せて用いられた事例が22件であった。

次に、水抜き工法の内容別に水抜き効果の効果が高い場合と低い場合を比較した。効果が高い場合と低い場合の頻度分布を図-3に示す。図-3によると、先進導坑のみの対策では水抜き効果が低い事例数（6件）が高い事例数（2件）を上回ったが、先進導坑と先進ボーリングとを組合せた場合には水抜き効果が高い事例数（6件）が低い事例数（2件）より多いことがわかる。このことから、先進導坑のみでは水抜き効果の対策として不十分であるが、先進ボーリングは水抜き工として有用であることが示唆される。

その一方で、先進ボーリング工を実施した場合でも排水が不十分なために土砂流出等の変状が併発した水抜き効果の低い事例が53件中19件見受けられた（図-3）。これは先進ボーリングを実施した事例のうち約4割にあたる。このうち、先進ボーリング孔からの排水量が少なかった事例は14件であった。そこで、これらの事例については素因（地質・地下水条件）、誘因（施工中の状況判断等）との関係を表-1に整理した。

#### (2) 先進ボーリング孔からの排水量が少なかった事例における分析結果

集中湧水リスクの素因は、断層の背面に帯水部が存在する場合が14件中9件と最も多かった（表-1）。この素因に対応した誘因は、先進ボーリング孔からの湧水量が

少ないために切羽集中湧水量も少ないと誤認したと考えられる場合が、他の誘因と複合した場合も含めると6件と最も多かった。次に多かった誘因は、切羽前方探査の内容として、断層付近においてもそれまでと同様に規則的な先進ボーリングあるいは探り削孔を実施していた場合の4件が挙げられる。

このことから、集中湧水リスクを回避・低減するためには、日常的に実施している切羽前方探査に加えて断層の出現位置を想定した先進ボーリングを別途実施することが有効と考えられる。また、断層周辺の透水性状は複雑なことが多いことから、水抜き用の先進ボーリングの本数を一時的に増やすことが有効と考えられる。

ただし、断層の出現位置を想定した先進ボーリングを別途実施して断層を捉えた場合でも、周辺の地質情報の取得不足のために切羽湧水量は予測とは大幅に異なった事例も見受けられた。

例えば、新親不知トンネル（東工区）では実際は断層破砕帯周辺に安山岩脈が貫入していたが、先進ボーリングのコアからはその構造が確認されなかった。また、先進ボーリング孔からの湧水量は極少量であったが、掘削時においては29m<sup>3</sup>/分の集中湧水が発生し、2400m<sup>3</sup>の土砂流出を併発したことが報告されている<sup>9)</sup>。他には、日暮山トンネル（Ⅰ期）では実際は二つの断層破砕帯の交差部であったが、先進ボーリングのコアの状態から判定できたのは片方の断層のみであった。また、先進ボーリング孔からの湧水量は90ℓ/分であったが、掘削時においては0.8 m<sup>3</sup>/分の集中湧水が発生し、切羽上部より崩壊、土砂流出が併発したことが報告されている<sup>9)</sup>。

それらの事例を踏まえると、断層の位置確認のみでは不十分となる場合があり、先進ボーリングから得られる情報の取得量や解釈の確実度を向上させることが必要であると考えられる。例えば、コア観察においては、ボアホールスキャナを併用することにより、断層や割れ目の分布を詳細に把握した上で断層およびその周辺の透水性状を解釈すべきことが考えられる。

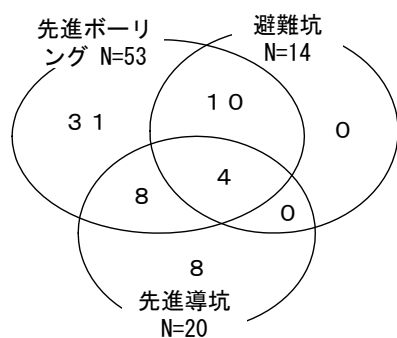


図-2 水抜き工の内容別の実施状況

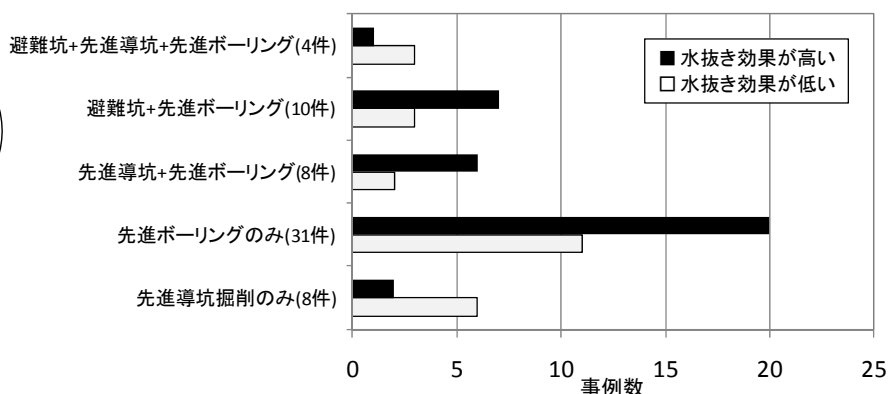


図-3 水抜き工内容別の頻度分布

表-1 先進ボーリング孔からの排水量が少なかった事例における素因・誘因

| 素因<br>(地質・地下水条件)                    | 誘因(施工中の状況判断等)                                                                                                     | 今後の教訓                                      | 事例数 | 事例(トンネル名)                                                                                      |
|-------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|-----|------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 断層の背面に帯水部<br>が存在                    | 先進ボーリングにより湧水は確認されたが、その湧水量が少なかったことから、切羽における集中湧水量も少ないものと判断し切羽を進めた。                                                  | 断層周辺の透水性状は複雑であり、地下水が残存している可能性について考慮すべきである。 | 2   | 飯山(上倉工区) <sup>7)</sup> , 第三紫尾山 <sup>8)</sup>                                                   |
|                                     | 一つの断層は確認していたが、実際には二つの断層の交差部であった。その分布状況を先進ボーリングでは確認できなかった。先進ボーリングによる湧水量は少量だったことから切羽における集中湧水量も少ないものと判断し切羽を進めた。      | ボアホールスキャナの併用を含め詳細なコア観察を実施すべきである。           | 2   | 湖北(岡谷側工区) <sup>9)</sup> , 日暮山(Ⅰ期) <sup>6)</sup>                                                |
|                                     | 先進ボーリングにより断層破砕帯は確認できた一方で、割れ目に多量の地下水を胚胎している火山岩脈の分布状況を確認できなかった。先進ボーリングによる湧水量は極少量だったことから切羽における集中湧水量も少ないものと判断し切羽を進めた。 | ボアホールスキャナの併用を含め詳細なコア観察を実施すべきである。           | 1   | 新親不知(東工区) <sup>5)</sup>                                                                        |
|                                     | 作業坑掘削時に断層破砕帯を確認しており、集中湧水があった。本坑での先進ボーリングにおいても湧水が確認されたが、その湧水量が少なかったことと作業坑での水抜き効果と合わせて切羽における集中湧水量も少ないものと判断し切羽を進めた。  | 断層周辺の透水性状は複雑であり、地下水が残存している可能性について考慮すべきである。 | 1   | 子不知 <sup>10)</sup>                                                                             |
|                                     | 規則的な先進ボーリングあるいは探り削孔を実施していたが断層の出現位置を想定した先進ボーリングは実施していなかった。                                                         | 断層の出現位置を想定した先進ボーリング計画を立てるべきである。            | 4   | 新親不知(西工区) <sup>5),11)</sup> , 蘇武 <sup>12)</sup> , 飯山(上倉工区) <sup>7)</sup> , 第三紫尾山 <sup>8)</sup> |
|                                     | 先進ボーリングにおけるコア採取率は良くなかったが掘削可能と判断した。                                                                                | 断層粘土のコア取得ができなかった可能性を考慮すべきである。              | 1   | 日足 <sup>13)</sup>                                                                              |
| 基質が難透水性                             | 細粒分の多い凝灰角礫岩で難透水性岩盤であり、先進ボーリングによる排水を試みた結果、排水効果がなかったがそのまま続行した。                                                      | 大孔径や導坑掘削長を長くすると等への切替を速やかに実施するべきである。        | 1   | 岡谷 <sup>14)</sup>                                                                              |
|                                     | 先進ボーリングによる湧水量は少量だったことから切羽における集中湧水量も少ないものと判断し切羽を進めた。                                                               | 岩盤が破砕されて細粒化したために排水されにくい可能性を考慮すべきである。       | 1   | 新佐敷(そのⅠ工区) <sup>15)</sup>                                                                      |
| 割れ目が多い                              | 周囲の火山岩類中の割れ目に胚胎している地下水の存在をあまり考慮せず、先進ボーリング孔からの湧水量が少なかったことから、切羽における集中湧水量も少ないものと判断し切羽を進めた。                           | 周囲の火山岩類中の割れ目に胚胎している地下水の存在についても考慮すべきである。    | 1   | 甲子 <sup>16)</sup>                                                                              |
| 掘削後の緩みによる割れ目挟在粘土の流出                 | 掘削後の割れ目の緩みは想定していなかった。また、先進ボーリング実施時点の湧水量により切羽における集中湧水量も少ないものと判断し切羽を進めた。                                            | 割れ目に粘土を挟む場合は、掘削後にゆるむ可能性を考慮すべきである。          | 1   | 南予用水吉田導水路 <sup>17)</sup>                                                                       |
| 過去の地すべりに崖錐堆積物が充填した箇所<br>の背面に高透水部が存在 | 当初は断層を想定していたが、先進ボーリングを実施した結果、断層が出現しなかったことから湧水のリスクは少ないと判断した。                                                       | ボアホールスキャナの併用を含め詳細なコア観察を実施すべきである。           | 1   | 日暮山(Ⅱ期) <sup>18)</sup>                                                                         |

#### 4. まとめと今後の課題

山岳トンネルの施工中において集中湧水リスクが発現した事例は、644件中180件あり全体の28%を占めた。そのうち、集中湧水発生前に水抜き工を実施した61事例について、その内容と集中湧水リスク回避・低減効果との関係を分析した。その結果、先進ボーリング工を実施した事例の約4割においてリスクの低減効果が低かったことが見受けられた。

その主な原因は、集中湧水リスクとなる素因を有するが、地質・地下水状況に係る取得情報量の不足に伴い解釈が不確実となり素因を認識できていなかった場合や、地山の透水性状等の不均質性に伴い先進ボーリング孔からの湧水量が少ない現象を集中湧水リスクは低いと誤認したことを誘因とすることにあると考えられる。

今後は、その対策として素因に係る情報の取得量や解釈の確実度を向上させることを目的としたボーリングコアの記載における留意点をとりまとめる予定である。

#### 参考文献

- 1) (社)全国地質調査業協会連合会：地質リスクに関する調査・研究，企業間連携等の推進に関する調査・研究委員会報告書，61p.，2007.
- 2) 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，Vol.23，pp.19-54，2003.
- 3) 土木学会：2006 年制定 トンネル標準示方書 山岳工法・同解説，322p.，2006.
- 4) (社)日本道路協会：道路トンネル観察・計測指針 平成 21 年改訂版，290p.，2009.
- 5) 東光秋，小野正文，寺本哲，坂田和幸：糸魚川ー静岡構造線に近い断層破砕帯を貫くー北陸新幹線 新親不知トンネルー，トンネルと地下，Vol.39，No.9，pp.7-14，2008.
- 6) 中村良明，羽田勝，木曾伸一：超膨脹性泥岩を克服

- ー上信越自動車道 日暮山トンネルー，トンネルと地下，Vol.24，No.1，pp.7-16，1993.
- 7) 依田淳一，高原英彰，高橋秀典，川越健：偏在する高圧帯水層中を切羽前方湧水圧調査による管理で掘削ー北陸新幹線 飯山トンネル富倉工区ー，Vol.38，No.1，pp.7-15，2007.
- 8) 今村光明：九州四万十帯を貫くトンネル施工ー第3紫尾山トンネルー（特集 九州新幹線 新八代・西鹿児島間建設の軌跡），土木施工，Vol.45，No.3，pp.61-64，2004.
- 9) 鎌倉勝美，大澤和幸，川浦学，山田謙二，反り目好男：高水位・断層破砕帯におけるトンネル掘削実績，第 46 回施工体験発表会（山岳），pp.121-130，2000.
- 10) 杉山保利，山橋正文，岡田正男，坂田和幸：子不知衝上断層を克服ー北陸自動車道 子不知トンネルー，トンネルと地下，Vol.19，No.3，pp.7-14，1988.
- 11) 早坂治敏，西則義，坂田和幸，内山大：断層破砕帯の湧水を新たな水抜き工で突破ー北陸新幹線 新親不知トンネル西工区ー，トンネルと地下，Vol.30，No.11，pp.7-15，1999.
- 12) 樋上尚子，森川武浩，西本和生，實松茂幸：予期せぬ異常湧水に挑戦ー国道 482 号 蘇武トンネル日高工区ー，トンネルと地下，Vol.33，No.1，pp.17-28，2002.
- 13) 内田義一：日足トンネルの土砂流出対策，トンネルと地下，Vol.7，No.9，pp.8-14，1976.
- 14) 代田武夫，田牧厚，西谷直人：糸静構造線の湧水地帯にトンネルを掘るー中央自動車道長野線 岡谷トンネルー，トンネルと地下，Vol.17，No.1，pp.19-28，1986.
- 15) 竹下卓宏，森山安夫，伊藤典彦，益子篤史：付加体の破砕質粘板岩層を早期閉合で施工ー日奈久芦北道路 新佐敷トンネルー，トンネルと地下，Vol.40，No.6，pp.17-24，2009.
- 16) 岩渕誠，篠田耕二，原淳二，新居直人：重金属と突発湧水への対応ー国道 289 号 甲子トンネルー，トンネルと地下，Vol.37，No.11，pp.15-23，2006.
- 17) 角田豊，石川肇：南予農業水利事業・吉田導水路工事の概要，建設の機械化，No.465，pp.24-32，1988.
- 18) 藤田芳邦，谷井敬春，高橋浩，菊地裕一：土かぶり 130m の地表面陥没に至った大崩落ー上信越自動車道 日暮山トンネル東工事ー，トンネルと地下，Vol.34，No.1，pp.7-14，2003.

## CASE STUDIES FOR RISK ASSESSMENT OF WATER INRUSH DURING MOUNTAIN TUNNEL CONSTRUCTION

Sunao KANAZAWA, Toshiyuki KURAHASHI and Yasuhito SASAKI

Water inrush occurred in 180 (28%) of 644 cases of geological risk events related to mountain tunnel construction. For the purpose of reducing the risk of water inrush, we analyzed cases in which drainage operations were minimally effective despite the use of advance boreholes. Analysis results revealed two disadvantages to advance borehole operation. First, geological or hydrological interpretation from core observation was uncertain due to insufficient observable core. Second, the amount of drainage from advance boreholes was not an accurate reflection of the existing water due to the complexity or heterogeneity of permeability distribution.