

湧水量の測定と水質分析による坑内湧水の発生予測

Evaluation method of spring water in tunnel using by statistical analysis of water quantity and chemical analysis

笠 博義¹⁾、今井 久²⁾、清水 学³⁾、水端八朗⁴⁾、越野洋一⁵⁾

Hiroyoshi KASA, Hisashi IMAI, Manabu SHIMIZU, Hachiro MIZUBATA, Yoichi KOSHINO

Spring water in tunnel have an influence on tunneling. Some investigation and analysis were carried on to estimate the quantity of spring water and to forecast the locality have large underground water, on the escape tunnel of Hakamagoshi Tunnel which was excavated by TBM.

The result of this study were as follows.

- 1) The quantity of water spring in tunnel over the whole tunnel was estimated by statistical analysis of the water quantity data on excavated section of the tunnel.
- 2) The locality which have large underground water were forecast by geological data.
- 3) A changing of water quantity was evaluated by chemical analysis of water.

Key Words: spring water in tunnel, statistical analysis, chemical analysis, lineament

1. はじめに

トンネル掘削においては、坑内湧水の量やその発生状況が工程や施工法などに大きな影響を及ぼす。特に TBM 工法においては、大量の湧水によって TBM 本体の電気・機械系統が支障を来し、掘削が不能になる恐れがあることから、湧水対策を事前に十分に検討しておく必要がある。通常のトンネルの設計においては、事前の地質調査やボーリングまたは物理探査結果などをもとに地下水の状況を予測することが多く、これまでの類似地質条件下における掘削実績などをもとにして設計がなされることも多い。また、必要に応じては水文学的な検討から湧水量の予測を行うこともある。しかし、土被りの大きな山岳トンネルでは、一般に湧水に関する正確な事前予測は困難であり、施工中の湧水状況に基づいて、施工に伴って逐次対策を講じることも少なくない。

本研究は、TBM で掘削される東海北陸自動車道袴腰・城端トンネル避難坑工事において、坑内の排水設備について検討するために、既掘削区間の湧水量の推移と湧水の化学的な特徴から、湧水予測を行った結果について報告するものである。

本研究における検討内容は以下のようにまとめられる。

- ① トンネル全体の平均的な湧水量を既掘削区間の湧水量から推定することを試みる。
- ② 大量湧水の発生可能性がある地点を地形・地質データから推測する。
- ③ 湧水の水質分析によって、その特徴を明確にし、それぞれの地点における湧水の変化について予測する。

-
- 1) 正会員 博士(工学) ハザマ土木本部トンネル統括部
 - 2) 正会員 修士(工学) ハザマ技術研究所技術研究部土木研究室
 - 3) 修士(工学) ハザマ北陸支店 袴腰・城端トンネル作業所
 - 4) 日本道路公団北陸支社富山工事事務所 城端工事区 工事長
 - 5) 日本道路公団名古屋建設局建設第二部 調査役

2. 対象トンネルの概要

袴腰トンネル（延長約6 km）は北陸地方と東海地方とを連絡する東海北陸自動車道の一部として建設されるもので、ほぼ富山県と岐阜県の県境付近に位置する。袴腰トンネル本坑は NATM で施工され、これと中心離隔 30m で掘削される避難坑はφ4.5m の TBM 工法で施工される。本研究はこの避難坑の建設において、TBM 工法による高速掘進をより確実に実現するために実施したものである。本地域は、地質的には第三紀の流紋岩質凝灰岩類を主体としており、これに多数の第四紀の貫入岩類（ドレライト、ひん岩、石英斑岩など）が板状または脈状に貫入している。また路線上にはいくつかの断層が確認されている。

なお、袴腰トンネルは最大土被りが 600m 以上に達し、トンネル上部の一部には厚い地すべり堆積物が分布することなどから、地表踏査で得られる情報も限定されており、湧水に関しては過去の類似トンネルなどの事例からの推測によって評価がなされていた。



図－1 トンネル掘削の概要

トンネル掘削は南北の両坑口からの本坑掘削が先行し、これを北坑口から掘削した避難坑掘削の TBM が途中で追い越した後、南坑口からの本坑と交差する形で進められた。このため、TBM 掘進では、図－1 に示すように、南北両坑口からの本坑先進区間と中央部の避難坑先進区間とが存在することとなり、湧水の検討においてもこの区間毎の検討が必要であると考えられる。これは、本坑先進区間では、本坑掘削によって周辺の地下水位が低下し、全体として湧水の影響が低減されるものと考えられるためである。また、TBM 先進区間ではその途中で下り勾配に変化することから、少なくとも TBM が本坑より先行する区間においては、湧水量の予測を行い、十分な排水設備を準備する必要がある。こうしたことから、本検討では主として避難坑が先進する区間におけるデータを基にした検討結果について述べるものとする。

3. トンネルの湧水予測方法

トンネルの湧水量の予測は、本来、その目的に応じて、水文地質、水収支、水文環境に大別される多くの手法を組み合わせ、広域を長期に渡って調査し、それらの調査結果を総合的に判断する必要がある。また、予測の項目では、湧水位置と湧水量といった基本的な項目の他に、水圧、水質などがあり、施工面では湧水による切羽の自立性を評価することも重要である。同時に、計画段階での予測か、施工中の予測であるか、または竣工後の長期間に渡る水利状況に関するものであるか等の目的に応じて、その調査範囲、期間、手法を検討する必要がある。トンネルの湧水の予測に用いられる代表的な 3 手法について表－1 にまとめた。

今回の検討は、その目的において示したように、今後施工される区間の全体的な湧水量の予測して、TBM 施工を進めるために必要な情報を得ることが目的であり、短時間に、しかも新たに大規模なボーリングや物

表－1 湧水予測手法の概要

	統計的手法	水文調査による方法	水収支シミュレーション
概 要	類似トンネルの事例や近接区間の実績を基に統計的に予測する手法	水文調査結果をもとに水理公式に基づき予測する手法	トンネル周辺の水文地質をモデル化し、地下水挙動を数値計算によって計算する手法
特 徴	比較的容易に、大局的な予測が可能	水の流入・流出に着目した基本的な手法である	モデル化が適切に行われれば、正確な予測が可能
問題点	条件的に一致するケースが必ずしも存在しない。統計的手法であるので誤差が問題となる	精度を要求する場合は、広範囲を長期間に渡って調査する必要がある	正しい水文地質モデルを構築するためには、多数の現地調査データ等が必要

理探査などを行うことなく実施する必要があった。このため、本検討では、概略的な湧水量把握を目指すこととして、表-1に示した統計的な手法により発生量を予測することとした。また、発生位置および湧水の変動状況については、後述する地質調査結果および水質分析による手法を用いて予測・評価を行うこととした。各予測・評価項目とその検討方法について以下に示した。

- ① トンネル全体の湧水量の予測：既掘削区間の湧水量に基づく比湧水量（単位区間当たりの湧水量）より今後の発生量を推定し、逐次、データを更新することにより補正を行う。
- ② 大量湧水の発生位置の推定：地質調査・リニアメント判読結果によって湧水が発生する可能性の高い地質的な不連続面を把握する。
- ③ 発生湧水の変動：水質分析で湧水の発生起源を推定し、その特徴に応じてタイプ別に分類する。現場における水温、pH、電気伝導度の基本的な3項目に加えて、水質の化学分析およびラドン濃度の測定によって坑内湧水の特徴を明確にして、これをもとに湧水の流出動向を予測する。

4. 湧水状況の予測結果

4.1 湧水量の予測結果

避難抗トンネル全体の湧水量の予測を行うために、既掘削区間の比湧水量を整理したものが、図-2である。この図では、掘進距離に伴う比湧水量の変化を示している。ここで、比湧水量は掘進距離に伴い漸増する傾向を示すが、突発的な大量湧水に伴うデータを別にすれば、その値は1.0程度あることが読みとれる。このことは、本トンネルでは、1km 当り $1.0\text{m}^3/\text{min}$ の定常的な湧水が想定されることを示している。

上述の検討結果をもとに、TBM と南坑口からの本坑が交差する地点に近い約 4km 地点の湧水量を

予測すると、その総湧水量は $4.0\text{m}^3/\text{min}$ となる。この位置での実績値は $6.0\sim 6.5\text{m}^3/\text{min}$ とこれを上回ったが、これはここで検討した区間以降に発生した突発湧水の影響によるものと考えられる。この突発湧水の影響を補正するには、その湧水量を別に求める必要があるが、実際には突発的な湧水の量を予測することは困難である。ここでは、掘進距離によって比湧水量も漸増するものとして、図-2に示した回帰式(1)からその値を検討することを試みた。

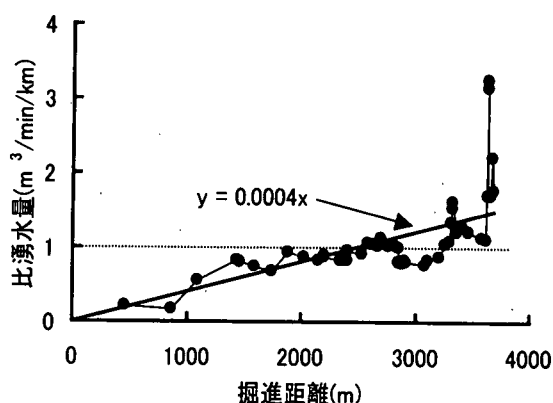


図-2 掘進距離による比湧水量の変化

$$\text{総湧水量 } Q = (0.0004 \times 4000\text{m}) \text{ m}^3/\text{h}/\text{km} \times 4\text{km} = 6.4\text{m}^3/\text{h} \quad (1)$$

このように、回帰式によって求められた値は、実績値とほぼ一致する。

ここで、本トンネルにおける突発的な湧水は、発生後その量が短期間に減少する傾向があることから、総湧水量の増大は一時的なものとなり、湧水量はその後減少する。しかしながら、下り勾配における TBM 掘進では、一時的にはあるにせよマシンが水没するような状況になった場合は、その後の復旧が困難となる危険性があることから、湧水量の検討においては、ある程度の突発的な湧水を考慮した評価が必要になる。この方法としては、突発的な湧水量をそれまでの突発湧水量の実績値や類似したトンネルの事例を基に、恒常的な湧水量に上乗せする方法が一般的であると思われるが、上で試みたような比湧水量自体に突発的な要因による変動を加味した検討方法も一つの方法であると考えられる。

4.2 大量湧水発生位置の予測

今回の検討対象地域である袴腰山周辺の地形は、飛騨山地に連なる比高400m以上の起伏に富んだ急峻な山岳地形を呈している。トンネル路線上の土被りは、前述したように最大で640mと大きく、山体を構成する地質が、一般に亀裂が発達し、大量の地下水が伴うことが多い流紋岩質凝灰岩類であることなどから、ほぼ全線にわたり比較的多量の湧水が発生することが予想された。また、事前調査結果では、この地域にはリニアメントとして認定される連続性の高い直線状の谷地形がいくつか指摘されていた。これらのうちには地質踏査や弾性波探査結果から、断層破碎帯に相当するものも含まれており、一部には明瞭な断層露頭が確認されているものもある。

一方、袴腰山の周辺を流れるこうした谷の大半は水量も多く、袴腰山南斜面の大規模地すべり地周辺では池や湧水も観察されている。こうしたことから、本地域における破碎帯は滞水している場合が多いものと想定される。さらに、避難坑に先行した区間の本坑における大量湧水箇所も、破碎帯もしくは貫入岩部であったことから、こうした地質的な不連続面では湧水量が増加するものと考えられる。

以上のようなことから、本地域では、断層や貫入岩などの地質的な不連続面で大量湧水が発生するものと予想され、既存の地質調査結果を補完する現地踏査を行い、合わせて空中写真や人工衛星データ等を判読することによって、大量湧水が発生する可能性がある地点を予測することとした。ただし、こうしたデータはあくまでも地表面の情報であることから、坑内の地質観察結果で事前の地質構造を逐次修正する等の対策を講ずる必要がある。

検討結果として、断層などの地質的不連続面およびリニアメントの位置と、北坑口～避難坑先行区間での $1\text{m}^3/\text{min}$ 以上の大量湧水発生位置および、約3600m地点で実施した大量湧水の予測箇所3カ所を図-3に示した。この図から、 $1\text{m}^3/\text{min}$ 以上の大量湧水発生地点は、300～700mに1回程度の間隔で発生しており、その大半が断層破碎帯、貫入岩などの地質的な不連続面で発生していることがわかる。このことから、本トンネルにおいては、数百mに1回程度で、 $1\text{m}^3/\text{min}$ 以上の突発的な湧水が発生することが想定される。

また、大量湧水の発生地点となった断層破碎帯や貫入岩部または地質境界部は、地上におけるリニアメントの判読位置と比較的よく一致していることがわかる。

こうした大量湧水の概略的な発生位置に関しては、今回実施したような地質検討からも予想できるが、図中の予測結果が厳密には実績と一致しないことからわかるように、この方法では施工において十分な精度での予測は困難である。すなわち、実施工において要求される10m程度のオーダーでの湧水発生地点の評価は、地質調査結果からのみでは不可能であり、実際にはボーリング等の手法によって確認する必要がある。本トンネルにおいては、坑内からのボーリングが容易ではないTBMによる施工であったため、TSP探査結果によって、各探査区間ごとに間接的に湧水の発生危険性について推定を行った。

なお、今回、事前の地質情報による地質的な不連続面の対応が比較的良好であったことは、本地域の地質構造が比較的単純であったことや、断層などの不連続面の傾斜が大きく、地表面における情報がトンネルの位置まで

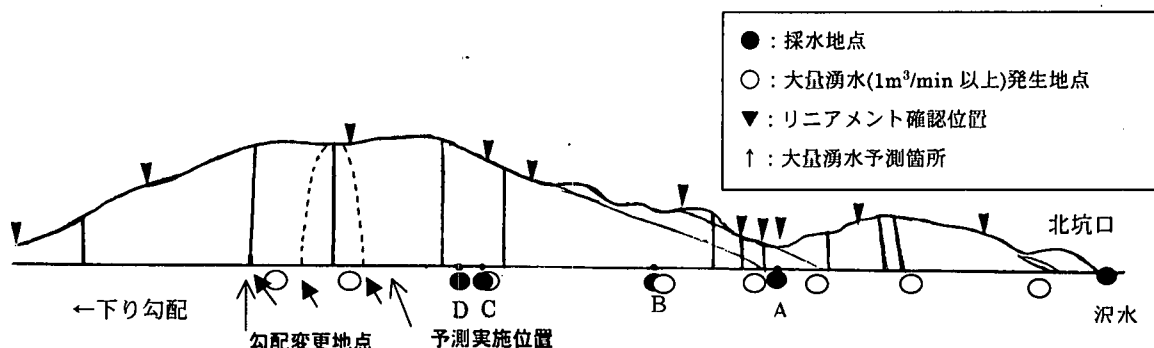


図-3 湧水発生地点の予測と採水箇所（北坑口～4800m）

適切に延長することができたこと等によるところが大きいと考えられる。

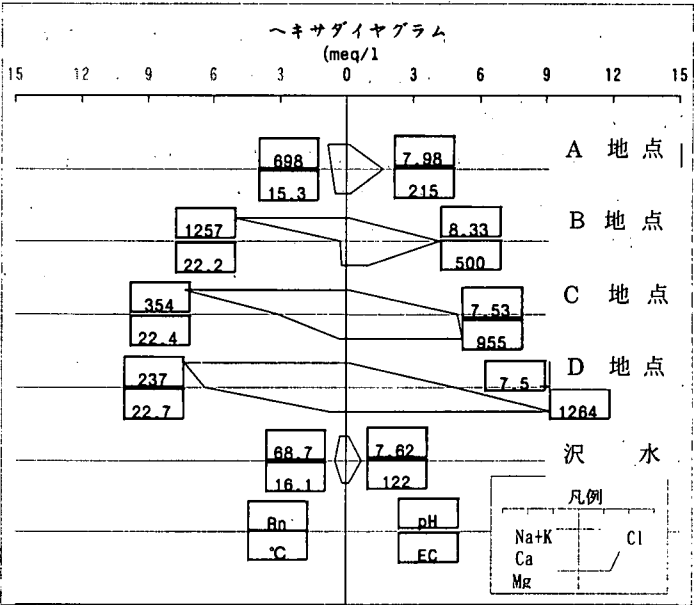
4.3水質分析による湧水の変動の予測

一度発生した湧水については、その量の経時的な変化が問題となる。すなわち、それがやがては枯れてしまうものなのか、半永久的に湧水が継続するのがトンネルの排水設備の設計でも重要である。

こうした湧水の変動について予測する目的で、水質分析を実施した。これは、湧水の化学的な組成や特徴から、その起源（成因）を推定して、今後の状況を推定しようとしたものである。具体的には、その含有イオン組成や濃度から、その水が地中に長期間に渡って滞留してしていたものなのか、地表水が短時間に浸透したものなのかを推定するものである。こうした検討から、各地点における湧水の類似性も明確になり、ある地点での湧水の変動傾向を同一起源と考えられる別の湧水に当てはめて考えることが可能となる。

図－4は代表的な4地点での湧水と地表の沢水の化学分析結果をヘキサダイアグラムで示したものである。このグラフは水の化学組成を多角形の形と大きさで表現したもので、視覚的にその特徴を捉えることが可能である。このグラフからわかるように、A地点の水は、地表の沢水ときわめて組成的に近く、他のトンネル湧水とは異なっていることがわかる。これは、この地点の湧水は地表水が短期間にトンネル内に浸透してきたことを示しており、この付近の地表水と連動性を有していることを示唆している。一方、これ以外の水は全般に含有イオン濃度も高く、長期間に渡って地中に滞留し、その間に多量の鉱物イオンを取り込んだことを示している。また、既掘削区間の湧水量の観測結果から、B～D地点の滞留水は一定期間湧出した後、急激に湧水量が減少していく特徴があることが確認されている。

以上のようなことから、本トンネルでは表－2にまとめたように、坑内湧水には大きく地表水型と滞留水型の2つのタイプがあり、全体的な傾向として、滞留水型の湧水については継続時間が短いことを、逆に地表水型の湧水は恒常的な湧水として捉えられることが推定された。また、両者の間には



図－4 湧水の水質分析結果

化学組成以外でも水温や電気伝導度にも差が見られるが、このことはこうした容易に測定できる指標でもある程度

の水質の評価が可能であることを示している。この結果を受けて、避難坑先進区間においては、大量の湧水が

表－2 水質分析による湧水タイプの分類

特 徴		湧 水		地表水
		地表水型	滞留水型	
水質分析結果	イオン濃度(meq/l)	低	高	低
	水温(℃)	低	高	変化
	pH	8	7.5～8.5	7.5
	電気伝導度(μ S/cm)	低	高	低
湧水継続時間		恒常的	一時的	

発生した地点では、現場において、水温、pH、電気伝導度の3項目を測定し、湧水の動向を推定するための一つの指標とした。

なお、水質分析結果は、坑内湧水を坑外に排出する際の水質的な問題点の有無を確認する上でも重要である。これは、特に火山地帯等における地下水では、その含有成分やpHなどの関係から、そのまま排出するのに問題がある場合もあるためである。

袴腰トンネルにおける湧水もB～D地点ではその水温が20℃以上であり、溶存成分も多く、温泉に該当することが考えられる。ここで、温泉法第2条では、次に示す項目のうちいずれかを満たせば温泉と見なすことが明記されている。

①温度：25℃以上、②溶存物質：1000mg/kg、③重炭酸ナトリウム340mg/kg、④ラドン濃度：2000pCi/L

この規定によれば、B、C地点が③の条件で、D地点が②、③の条件で法律上の温泉と認定されるが、pHに関していえば、弱アルカリ性であり、天然地下水としても普通に存在する範囲の水であることから、特に問題とはならないと判断された。

6. まとめと今後の課題

本研究は、袴腰トンネル避難坑掘削において、坑内湧水の排水について検討するために、湧水量、大量湧水発生位置、湧水の発生後の変動について、いくつかの方法で検討をした結果を報告したものである。その結果、TBMによる下り勾配掘進に必要な排水設備等を検討するために必要ないくつかの基本データを示すことができた。以下に本研究の成果を示す。

- ① 比湧水量から未掘削区間の湧水量を予測し、4～6.4m³/min という値を得ることができた。また、地質調査結果から突発的な湧水の発生間隔を求めた。これらの結果は TBM による下り勾配掘削区間の湧水対策を検討するための基礎的なデータとして有効に活用することができた。
- ② リニアメント判読や地質調査結果から、地質的な不連続面を抽出することによって、当該トンネル周辺の地質構造を推定することによって、概略的な大量湧水発生の可能性がある地点を予想することができる。しかし、施工上必要な精度での予測には、坑内における切羽前方探査などの技術によるより詳細な地質情報が必要となる。
- ③ 湧水の化学的な特徴を水質分析から求め、タイプ別に予測する指標を設けることによって、概略的な湧水の継続状況について、予測することができる。なお、水温、電気伝導度などように現場で容易に測定できる指標でもある程度の予測が可能である。

一般に、トンネルの湧水予測は難しいとされており、施工中に簡便に適用できる手法は少ない。しかし、本トンネルのように、地質構造が比較的単純で、掘進距離が長く、前半部でのさまざまな情報を後半部の予測に活用できるといったような条件が整った場合には、本研究で用いたような既存の湧水予測や調査手法を用いることによって一定の成果を出すことが可能であるものと考えられる。もちろん、こうした技術がどのような地質条件下でも成立するものではなく、より複雑な地質構造の場合や途中で大きく地下水理環境が変化するような場合は、適用が困難になるものと考えられる。このようなことから、各地質条件等に応じて有効な調査技術を選定して、それぞれの特徴を十分考慮した上で検討を行うことが必要であることは言うまでもない。

今後は、こうした検討事例を収集・蓄積して、さまざまな地質条件における適用性を評価する必要がある。また、地下水の水質分析については、坑内の湧水動向という面のみならず、周辺環境への影響を評価する上でも有用な技術であり、分析結果のさらなる有効活用について検討を進めて行きたいと思っている。

【参考文献】

- 1) (社) 日本トンネル技術協会：トンネル施工に伴う湧水濁水に関する調査研究（その2）報告書、1983