

大量湧水トンネルにおける水抜きボーリングの 孔内圧力損失の評価

熊本 創¹・平塚 裕介²・山本 肇³・金子 哲也⁴

¹正会員 大成建設株式会社 技術センター土木技術研究所 (〒245-0051 横浜市戸塚区名瀬町344-1)
E-mail: sou@ce.aisei.co.jp

²正会員 大成建設株式会社 技術センター土木技術研究所 (〒245-0051 横浜市戸塚区名瀬町344-1)
E-mail: hrtys00@pub.aisei.co.jp

³正会員 大成建設株式会社 技術センター土木技術研究所 (〒245-0051 横浜市戸塚区名瀬町344-1)
E-mail: hajime.yamamoto@sakura.aisei.co.jp

⁴大成建設株式会社 土木本部次世代プロジェクト部 (〒163-0606 新宿区西新宿1-25-1)
E-mail: t-kaneko@ce.aisei.co.jp

山岳トンネル工事にて大量湧水が発生した場合、工期・工費へ与える影響が大きい。水抜きボーリングは、切羽前方の湧水帯の地下水位を低下させる湧水低減対策工法の一つである。しかしながら、ボーリングからの排水量が非常に多い場合は、孔内で生じる圧力損失により十分な地下水位低下が生じず、水抜き対策効果が大きく低下する可能性がある。著者らは、圧力損失が水抜き効果に与える影響を定量的に評価することを目的とし、孔内圧力損失を考慮した地下水流動解析手法を開発した。そして、同解析手法を大量湧水事例の一つである飛騨トンネル（先進坑）に適用し、大量湧水条件下での水抜きボーリングの孔内圧力損失の評価を試みた。その結果、圧力損失の影響は、水抜きボーリングの孔長や配置によって異なり、効果的な水抜き対策の計画には、圧力損失を考慮した評価が重要であることが示された。

Key Words : mountain tunnel, drainage boring, pressure loss, groundwater flow analysis

1. はじめに

山岳トンネルの施工中に大量湧水が発生した場合、水抜き坑や水抜きボーリングにより切羽前方の地下水位や水压を低下させる対策が取られる^(例えば1)~3)。水抜きボーリングは水抜き坑よりも比較的簡易に実施可能であり、作業の安全性確保等の面でも有利であるため、その効率的な利用が望まれる。水抜きボーリングによる対策計画にあたっては、孔長、本数、配置などを事前に地下水解析によって定量的に決定することが望ましい。地下水流動解析で排水ボーリングの効果を検討する場合、ボーリング孔内の圧力が大気圧に解放されると仮定することが多い^(例えば4), 5), 6)。しかしながら、本研究で対象とする高土被りの山岳トンネルにおいては、ボーリングからの排水量が数t/min以上にも及ぶ場合があり、そのような場合には孔内の圧力損失が無視できず、孔内圧力が大気圧まで低下しないことが考えられる(図-1)。

そこで、本研究では、大量湧水時における水抜きボー

リング孔内の圧力損失を考慮可能な地下水流動解析手法を開発した。そして、同解析手法を大量湧水事例の

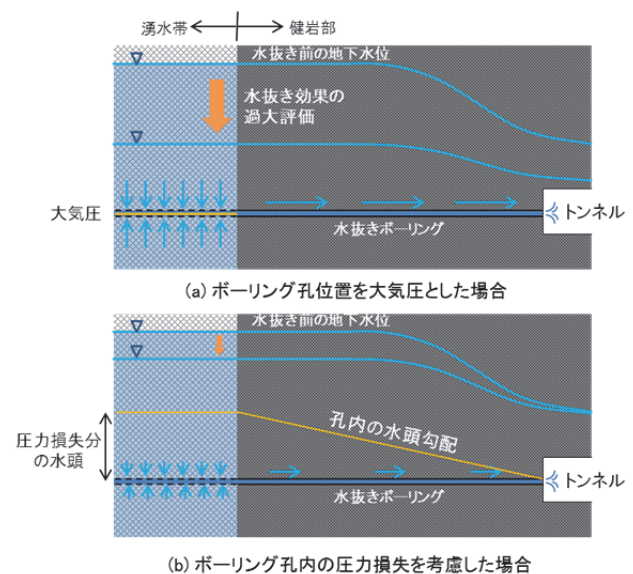


図-1 孔内圧力損失と水抜き効果の概念

一つである飛騨トンネル（先進坑）¹⁾に適用し、大量湧水下での孔内圧力損失を評価するとともに、それが水抜き効果に与える影響について考察した。

2. 解析手法の概要

(1) 従来の方法

水抜きボーリングによる水圧低下量を地下水流動解析によって評価する場合、ボーリング孔内の圧力を大気圧と仮定することが多い^{4), 5)}。この仮定は、周辺地盤からの湧水量に対して、水抜きボーリングの排水能力が十分であり、孔内の圧力がボーリング全長に渡って大気圧に解放されることが前提となる。具体的には解析モデル内のボーリング孔の節点に大気圧固定境界条件を適用する、あるいは水抜きボーリングを一次元要素によりモデル化し、十分に高い透水性を与えた上でボーリング口元を大気圧に固定する方法も考えられる^{例えは36)}。

しかしながら、湧水が多くなると、ボーリング孔内で生じる圧力損失を無視できなくなるため、上記の仮定に基づく地下水解析では水抜きの効果として得られる水圧低下量を過大評価することになる（図-1）。

(2) 本研究で提案する方法

本解析手法は、地盤内の地下水流れに加えてボーリング孔内の流体流れを連成して解くことにより、孔内の圧力損失を定量的に評価可能な方法である。

地盤内は、通常の三次元の飽和不飽和浸透流として取り扱い、ダルシー則と質量保存則を解く。ボーリング孔内は、圧力損失を伴う管路内の一次元の流体流れとして取り扱い、連続の式と下記の運動方程式を解く。

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{2} V^2 \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} - g \frac{\partial z_b}{\partial x} - g \frac{\partial h_f}{\partial x} \quad (1)$$

ここに、 V はボーリング孔内の断面平均流速、 t は時間、 P は圧力、 ρ は水の密度、 x はボーリング孔軸線上の座標、 z_b はボーリング孔軸線上の鉛直座標、 g は重力加速度を示す。 h_f は摩擦損失水頭であり次式で表される。

$$h_f = f \frac{L V^2}{d 2g} \quad (2)$$

ここに、 L はボーリング孔の長さ、 d はボーリング孔の口径を示す。 f は摩擦損失係数であり、以下のように定義される⁷⁾。

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -4 \log \left[\frac{2\varepsilon/d}{3.7} - \frac{5.02}{Re} \log \left(\frac{2\varepsilon/d}{3.7} + \frac{13}{Re} \right) \right] \quad Re > 2400 \quad (3)$$

$$f = \frac{16}{Re} \quad Re \leq 2400 \quad (4)$$

$$Re = \frac{\rho V d}{\mu} \quad (5)$$

ここに、 ε はボーリング孔壁の粗度、 Re はレイノルズ数、 μ は水の粘性係数である。以上より、ボーリング孔内の流速と水頭分布の関係は、ボーリング孔壁の粗度 ε と口径 d に依存することが分かる。

3. 孔内圧力圧損の水抜き効果に与える影響

(1) 解析モデルおよび設定条件

ここでは、上述の孔内圧力損失を考慮した解析手法を用い、圧力損失が水抜き効果に与える影響を検討する。

図-2に示す平板状の湧水帯モデルを対象として、圧力損失を考慮した場合と考慮しない場合について定常解析を行なった。解析モデルは、砂相当の高い透水係数（ $k=1.0 \times 10^{-5} \text{m/s}$ ）を有する厚さ100mの湧水帯とし、地下水位下1000mの深度に湧水帯の手前100mから水抜きボーリング（ $d=100\text{mm}$ 、 $\varepsilon=3\text{mm}$ ）を配置した。なお、湧水帯からボーリング口元までの100m区間はケーシング等の設置により地盤からボーリングへの湧水は無いものと仮定した。境界条件は、側面境界を1000mの全水頭固定とし、その他の境界を不透水境界とした。ボーリング孔内の境界条件を図-3に示す。圧力損失を考慮せず孔内が全て大気圧に開放されると仮定する場合は、ボーリング位置に相当する節点を全て大気圧固定とした（図-3(a)）。一方、圧力損失を考慮し、地下水と孔内流れを連成して解く場合には、ボーリング口元のみを大気圧固定境界とし

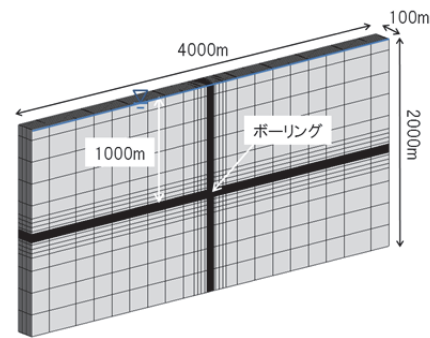
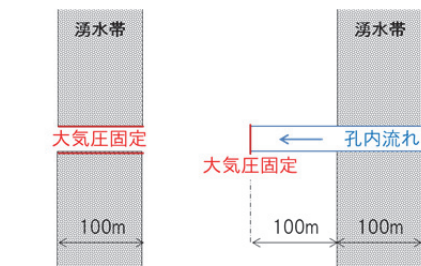


図-2 湧水帯モデル



(a) 従来の解析手法 (b) 本研究の解析手法

図-3 ボーリング孔内の境界条件

た(図-3(b))。

(2) 解析結果

表-1の解析結果から、ボーリング排水量は、孔内圧力損失によって約1/3まで低下することが分かる。図-4は孔内圧力損失を考慮した場合のボーリング孔内の圧力分布である。ボーリング口元から100m地点までの区間では、直線的な圧力上昇がみられる。これは、ケーシング等により周辺岩盤からの地下水流入がないと仮定しているため、上記区間では孔内の流量が一定となるためである。孔内圧力は、口元から100m地点で523m(約5 MPaに相当)もの大きな圧力が残っていることが分かる。すなわち初期水頭(1000m, 約10MPa)を半分程度に軽減する効果しか得られないことを示している。

表-1 ボーリング排水量の解析結果

ケース	ボーリングの湧水量 [t/min]
圧力損失を考慮しない場合	15.1
圧力損失を考慮した場合	5.4

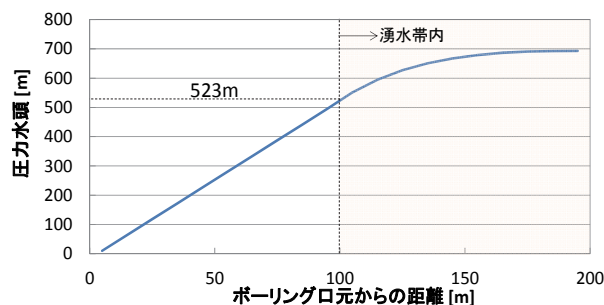


図-4 ボーリング孔内の圧力分布

4. 飛驒トンネル（先進坑）の再現解析

(1) 飛驒トンネル工事（先進坑）の概要¹⁾

飛驒トンネル（東海北陸自動車道）は、岐阜県北部に位置する全長10.7km、最大土被り約1000mの長大トンネルである。本坑に先立って施工された先進坑（掘削径4.5m）では、坑口から約2700m地点からはじまる大量湧水帯で湧水圧5.5MPa、坑口湧水量50t/minの大量湧水が発生した。図-5に、本研究で対象とした範囲について、文献¹⁾から読み取った施工順序を整理する。STEP①：大量湧水帯の掘削に先立ち、STA84+00付近にて先進坑から分岐した水抜き坑（断面積8.0m²）を先進掘削。STEP②：水抜き坑の掘削を完了（全長700m）し、その間に先進坑は大量湧水帯の直前付近まで到達。STEP③：水抜き坑の切羽から前方に長尺ボーリング（全長300m、 ϕ 216～85mmの段落し）を1本削孔。長尺ボーリング削孔完了時点で、先進坑は水抜き坑の先端付近まで到達。STEP④：先進坑が長尺ボーリングの先端付近まで到達。このとき、大量の湧水に伴う大規模な切羽崩落が発生。なお、大量湧水帯の先進坑掘削（STEP③、④の先進坑掘削）では、図-6に示すように、切羽からの水抜き対策として、中尺ボーリング（ $L=20\sim70$ m、 $\phi=100$ mm、4本/断面）と、短尺ボーリング（ $L=10\sim20$ m、 $\phi=65$ mm、5～12本/断面）を繰り返し実施している。

図-7には、施工中の湧水量の観測値を示す（文献¹⁾中のグラフからの読み取り値）。先進坑口の湧水量は、水抜き坑、長尺ボーリング、先進坑のそれぞれが大量湧水帯に突入した頃から急激に増加しており、STEP④時点で35t/minにまで達していることが分かる。

(2) 解析の目的

大湧水条件下における水抜きボーリングの孔内圧力損

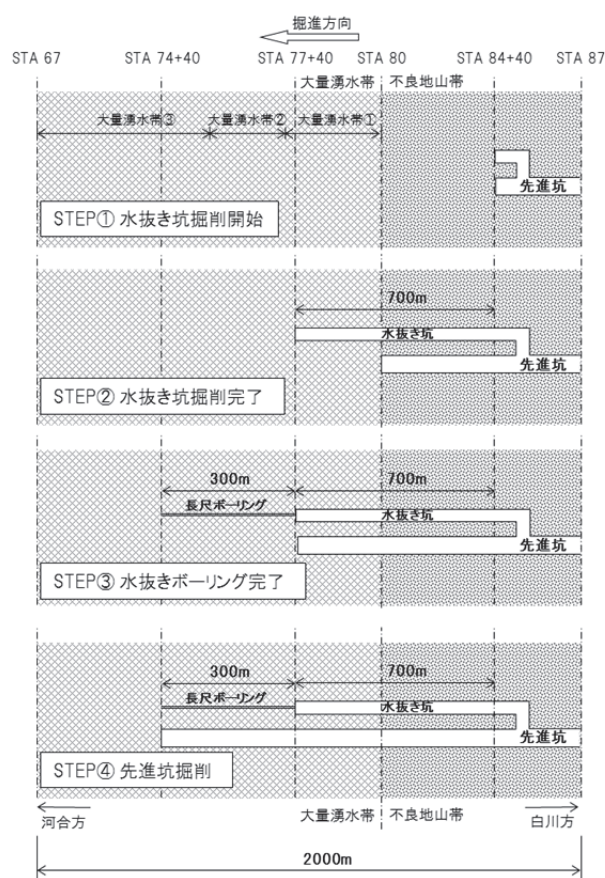


図-5 飛驒トンネル（先進坑）の施工順序

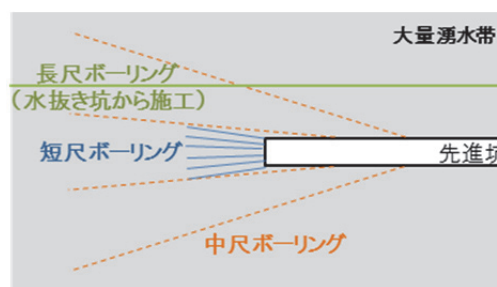


図-6 先進坑切羽からの水抜きボーリング配置

失の評価を目的とし、上記水抜き対策の再現解析を実施した。再現解析では実際の湧水状況を再現する地下水モデルを構築した上で、上述の短尺～長尺ボーリングの孔内圧力損失を計算して水抜き効果を比較・検討した。

(3) 解析モデル

解析モデルを図-8(a)に示す。モデル化領域は、トンネル軸方向2km（図-5の2km区間）、トンネル直交方向4km、深さ方向1.2kmの領域とした。先進坑からの土被りは、施工時の最大湧水圧5.5MPaを考慮して600mとした。また、トンネルの周囲30mの範囲はボーリング等の配置を考慮して、メッシュサイズを細かく設定した。図-8(b)、(c)に、水抜き坑と水抜きボーリングの配置を示す。掘削方向は全て先進坑と平行とし、設置高さや離隔については、文献¹⁾に記載の配置図を参考に設定した。水抜きボーリングの口径、長さ、ラップ長、本数については、文献¹⁾の記述を参考に、表-2のように設定した。

境界条件は、トンネルと平行するモデル側面を600mの全水頭固定とし、その他のモデル側面および上下面は不透水境界とした。解析は、トンネルやボーリング孔の掘削工程を模擬した逐次掘削解析とした。解析の開始は長尺ボーリングの掘削開始時（図-5のSTEP③以降）とし、逐次掘削の工程（図-9）は、文献¹⁾を参考に設定した。掘削ステップの時間間隔は1.5日とした。先進坑では、時間ステップごとに掘削済み箇所に対応する節点を順次浸出面境界に設定した。ボーリング削孔のうち、長尺ボーリングは日進3.3mの逐次掘削とし、短尺・中尺ボーリングは削孔期間が短いため、先進坑がラップ位置に達した直後に1ステップ（1.5日）で全長を削孔完了するものとした。ボーリング孔の境界条件は孔口節点のみを大気圧固定境界とし、孔内の圧力は上述の孔内流れモデルにより計算される。ボーリング孔壁の粗度はケーシングを設置した状況を想定し、鋼管相当の3.0mmと仮定した。

地山の透水係数は、湧水量の実測値と解析結果の比較から、湧水量の再現性の高い透水係数を逆推定した。湧水量の実測値の変動傾向から、大量湧水帯を3つに区分し（図-5の大量湧水帯①～③）、それぞれ異なる透水係数を推定した。推定した透水係数の設定値を表-3に示す。

(4) 解析結果

先進坑口、水抜き坑、ならびに長尺ボーリングの湧水量について、解析結果と実測値の比較を図-10に示す。湧水量の時間変化はいずれも実測値と概ね一致していることが分かる。図-11には、図-10の先進坑口の湧水量を先進坑と中・短尺ボーリングのそれぞれに分けて示した。これより、150日付近でいずれも流量が急増していることが分かる。これは、先進坑や中・短尺ボーリングが最

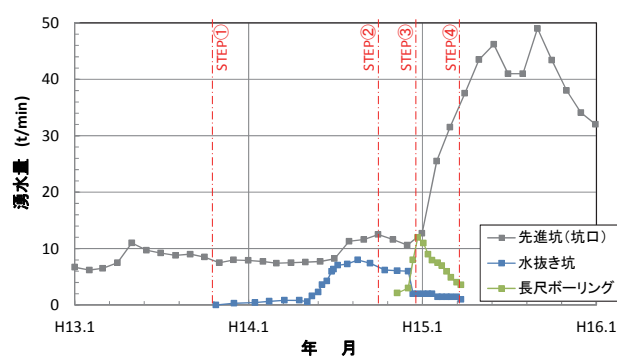


図-7 湧水量の時間変化

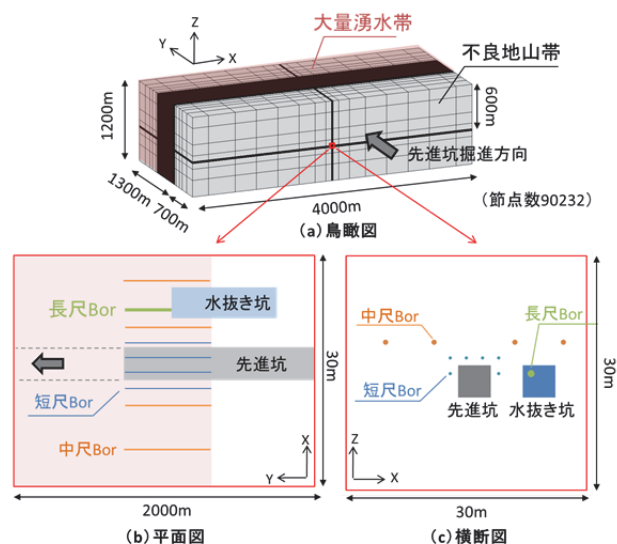


図-8 解析モデル（飛騨トンネル）

表-2 水抜きボーリングのモデル化

ボーリング	口径 [mm]	長さ [m]	ラップ長 [m]	本数 [本/断面]
短尺	65	30	5	6
中尺	100	80	10	4
長尺	150	300	-	1

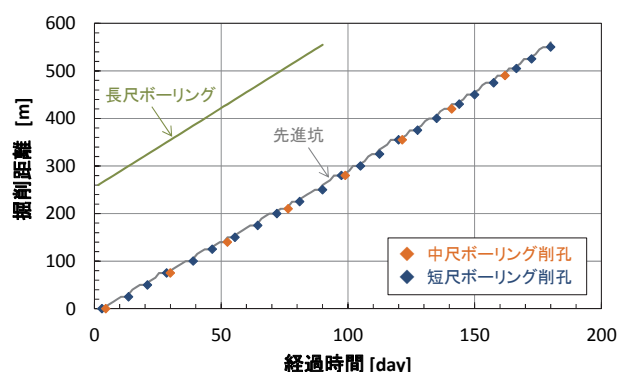


図-9 掘削工程のモデル化

表-3 透水係数の設定値

地質	透水係数 [m/s]
不良地山帯	2.0×10^{-7}
大量湧水帯	① 7.0×10^{-7}
	② 8.3×10^{-7}
	③ 5.6×10^{-6}

も透水性の高い大量湧水帯③に到達した時点を示している。図-11中には、同じ解析モデルと物性値を用いて、水抜き坑や水抜きボーリングなどの湧水対策を実施せず、先進坑のみを掘削した場合の解析結果を参考として示した。この結果から、無対策の場合、最終的に32t/minにまで達する先進坑の湧水量が、各種の湧水対策（水抜き坑、長尺ボーリング、中・短尺ボーリング）によって9t/minにまで低減されており、飛驒トンネルの湧水対策が23 t/min程度の水抜き効果があったものと推察される。

図-12には、各ボーリング孔内の圧力分布を示す。ここでは各ボーリングの排水流量が最大となる時間ステップ（各ボーリングの先端が大量湧水帯③に到達した時点）での孔内圧力分布を示した。全てのボーリングで圧力損失が無視できず、孔内圧力は大気圧よりも有意に上昇しているのが分かる。長尺のボーリングほど圧力損失が大きくなるが、特に長さ300mの長尺ボーリング先端の圧力水頭は150mにも達している。一方、圧力損失の影響が比較的小さいと考えられる短尺ボーリングにおいても先端で20m程度の圧力上昇が生じている。図-13には、先進坑が大量湧水帯③に到達する直前の切羽5m前方の全水頭コンターを示す。これを見ると、切羽近傍から削孔した短尺ボーリングの周辺では十分に水圧が低下しているのに対し、圧力損失の大きい長尺ボーリングの周辺は圧力の低下量が小さくなっていること分かる。これらの結果は、飛驒トンネルのような大湧水帯においては、長さが数100mを超える長尺のボーリングでは排水時の圧力損失が大きく、単体では十分な水抜き効果を期待できないことを示している。このことから、切羽前方の湧水帯の分布や性状の把握に有利な長尺ボーリングと水抜き効率の高い短尺ボーリングを組み合わせた同トンネルの水抜き対策は合理的かつ効果的であったものと考えられる。

5. おわりに

本研究では、大量湧水トンネルにおける水抜きボーリングの効果に着目した数値解析的検討を行った。孔内圧力損失を考慮した地下水流動解析手法を開発し、これを単純な湧水帯モデルならびに飛驒トンネル（先進坑）¹⁾の湧水対策の再現解析に適用した。その結果、大量湧水条件下における水抜きボーリング孔内の圧力損失の影響に関して、以下のことが明らかとなった。

- 1) 今回の湧水帯モデルの条件においては、圧力損失の考慮の有無により予測排水量に3倍程度の違いが得られた。ボーリング孔内の圧力を大気圧と仮定する従来の解析手法では、水抜き効果を過大評価する可能性がある。
- 2) 飛驒トンネル（先進坑）においては、数100mの長尺

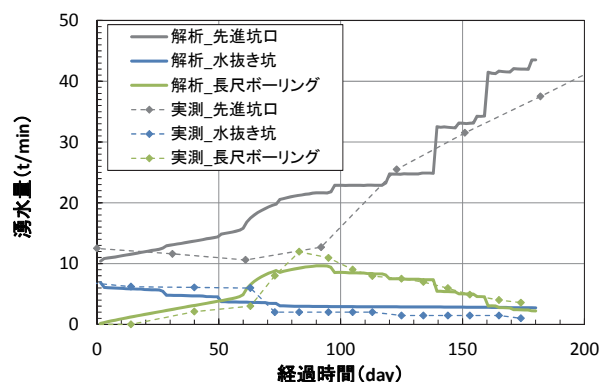


図-10 湧水量の解析結果と実測値の比較

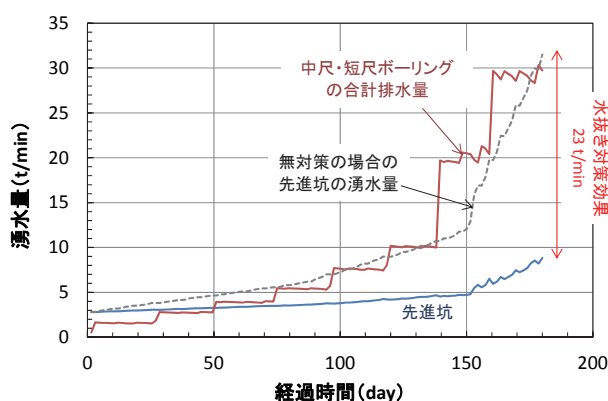


図-11 先進坑と水抜きボーリングの湧水量

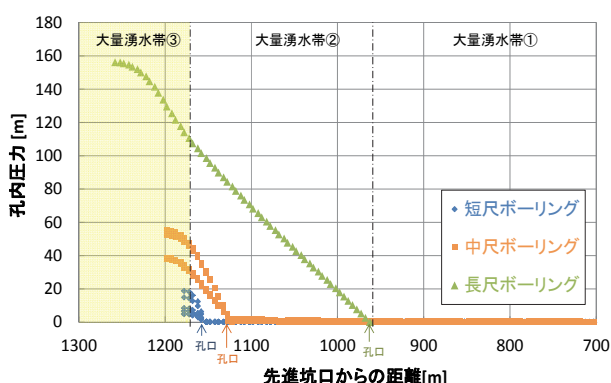


図-12 水抜きボーリング孔内の圧力分布

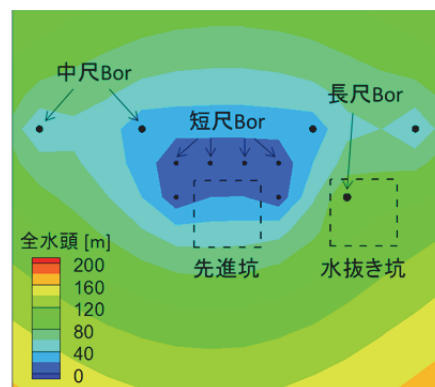


図-13 先進坑切羽前方5mの全水頭コンター

ボーリングでは排水時の圧力損失が大きく、単体では十分な水抜き効果を期待できない。切羽前方の湧水状況の把握に有利な長尺ボーリングと水抜き効率の高い短尺ボーリングを組み合わせた同トンネルの水抜き対策は合理的かつ効果的であったものと評価できる。

3) 今回の孔内圧力損失を考慮した解析手法は、水抜きボーリングの長さや配置による効果の違いを定量的に評価することが可能である。今後、大量湧水が予想されるトンネルでの湧水対策の計画や対策効果の評価に大きく役立つものと期待される。

参考文献

- 1) 寺田幸太郎, 川北眞嗣, 小林伸次, 築地功: 不良地山・高圧大量湧水との闘い (大量湧水編) 東海北陸自動車道 飛騨トンネル, トンネルと地下, Vol.35, No.9, pp. 679-689, 2004.
- 2) 武藤章, 鈴木和夫: 北アルプスの大湧水 (平湯低速度帯) に挑む 国道 158 号安房トンネル調査坑, トン

ネルと地下, Vol.20, No.6, pp. 427-434, 1989.

- 3) 大島洋志: 毎分 23t の以上湧水に挑む 山陽新幹線福岡トンネル東工区, トンネルと地下, Vol.4, No.8, pp. 610-619, 1973.
- 4) 岩井明彦, 蔡飛, 鵜飼恵三: 飽和-不飽和浸透流解析による地下水位の予測と斜面安定性評価, 地すべり, 第 36 巻, 第 4 号, pp. 8-13, 2000.
- 5) 除永強, 澤松俊寿, 林豪人, 藪雅行, 小橋秀俊: 盛土における水平排水パイプの地下水排除効果, 土木学会第 64 回年次学術講演会, III-299, 2009.
- 6) 西田憲司, 山上拓男, 蔣景彩: 三次元有限要素浸透流解析に基づく排水ボーリング効果の定量的評価法, 地すべり, 第 37 巻, 第 3 号, pp. 1-9, 2000.
- 7) Brill, J. P. and H. Mukherjee: Multiphase Flow in Wells, SPE Monograph Series, Society of petroleum Engineers Inc., Richardson, TX, USA, 1999.

(2014.9.15 受付)

EVALUATION OF PRESSURE LOSS IN DRAINAGE BORING UNDER LARGE GROUNDWATER INFLOW CONDITION

Sou KUMAMOTO, Yusuke HIRATSUKA, Hajime YAMAMOTO, and Tetsuya KANEKO

Large inflow of groundwater has been regarded as a crucial risk of mountain tunnel projects, because it can fatally increase time and cost required for the project. Drainage boring is an effective countermeasure for decreasing surrounding groundwater pressure in advance, and thus reducing tunnel inflow during excavation. However, the effectiveness of the drainage boring may be considerably degraded when the inflow rate is quite large, and the pressure loss along the boring is no longer negligible. In this study, the pressure loss along drainage borings was quantitatively evaluated through a groundwater flow simulation of an actual case. The Hida tunnel project was targeted for the case study, where the pilot tunnel suffered very large inflow (50 t/min). For the simulation, we used a new groundwater simulator recently developed to account for pressure loss in drainage borings. The simulation indicated that a long-distance boring with more than hundred meters had incurred very large pressure loss exceeding 1 MPa, and thus had been practically ineffective in reducing groundwater pressure ahead of the tunnel. Through the case study, it was confirmed that the simulation technique employed here is capable of quantitatively evaluating the effectiveness of each drainage boring, and would be useful for designing rational and effective drainage measures.