ボーリング孔内の圧力損失を考慮した地下水流動解析手法の開発

大成建設(株)　正会員　○平塚 裕介，熊本 創，山本 肇，金子 哲也

１．はじめに

山岳トンネル工事では大量湧水の発生が工期・工費へ与える影響が非常に大きい．大量湧水の対策としては水抜きボーリングなどが行われるが，その設計（配置，長さ，本数など）にあたっては排水効果を精度良く評価することが重要である．排水効果を地下水流動解析によって評価する場合，解析モデル上のボーリング孔位置の境界条件を大気圧で固定する方法が考えられる．しかし，水抜きボーリングからの排水量が多い場合，孔内の圧力は，圧力損失の影響を受けて大気圧まで低下しない．つまり，孔内圧力損失を考慮しないと水抜き効果を過大評価する可能性がある．そこで，本研究では，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，大量湧水トンネルの事例として報告されている飛騨トンネル（先進坑）[1)]の再現解析を通じて，解析手法の適用性を検討した．本報では，解析手法の概要と再現解析の結果について報告する．

２．解析手法の概要

本手法では，地盤内の地下水流れと孔内流れを連成して解析する．地盤内は，通常のダルシー則に従う地下水流れとして取り扱い，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う．孔内流れの計算では，連続の式と下記の運動方程式を解く．ボーリング孔内の流速や圧力分布は，ボーリング孔壁の粗度 ε と口径 d に依存する．

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

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

$$f=\frac{16}{R_e} \qquad (R_e<2400)$$

V：孔内断面平均流速　P：圧力　ρ：水の密度
x：ボーリング孔軸線上の座標
z_b：ボーリング孔軸線の鉛直座標
h_f：摩擦損失水頭　g：重力加速度
f：摩擦損失係数　ε：粗度　R_e：レイノルズ数
L：ボーリング孔の長さ
d：ボーリング孔の口径

３．飛騨トンネル（先進坑）の概要

飛騨トンネル（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 [1)]．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 地点からの大量湧水帯で湧水圧 5.5MPa，坑口湧水量 50t/min を超える大量湧水が発生した．湧水対策工として，図 1 のように全長 700m の水抜き坑（断面積 8.0m^2）が掘削され，その先端から 300m の長尺ボーリング（d=85～216mm）が 1 本削孔された．先進坑切羽からは，大量湧水帯の当初 560m 区間において，短尺ボーリング（長さ 10～20m，d=65mm，5～12 本／断面），および中尺ボーリング（長さ 20～70m，d=100mm，4 本／断面）による水抜きが繰り返し実施された（図 1 下図）．

４．解析モデル

図 1 の 2km 区間を含む３次元解析モデルを作成した（図 2）．モデル中央に先進坑を配置し，土被りは 5.5MPa の湧水圧を考慮して 600m に設定した．水抜きボーリングの口径や本数等は表 1 の通りモデル化した．境界条件は，モデル側面を 600m の全水頭固定とし，上面は大気圧固定，下面は不透水境界とした．透水係数は湧水量の実測値に基づいて逆解析的に推定した値を用いた（表 2）．また，ボーリン

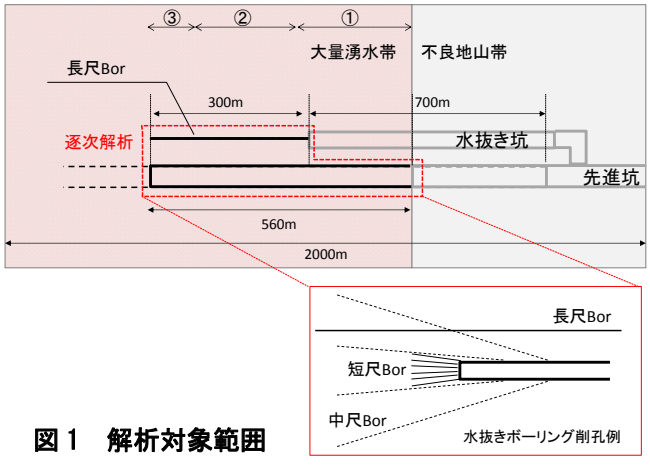

図１　解析対象範囲

キーワード　山岳トンネル，水抜きボーリング，圧力損失，浸透流解析
〒245-0051　神奈川県横浜市戸塚区名瀬町 344-1　大成建設(株)技術センター　TEL045-814-7237

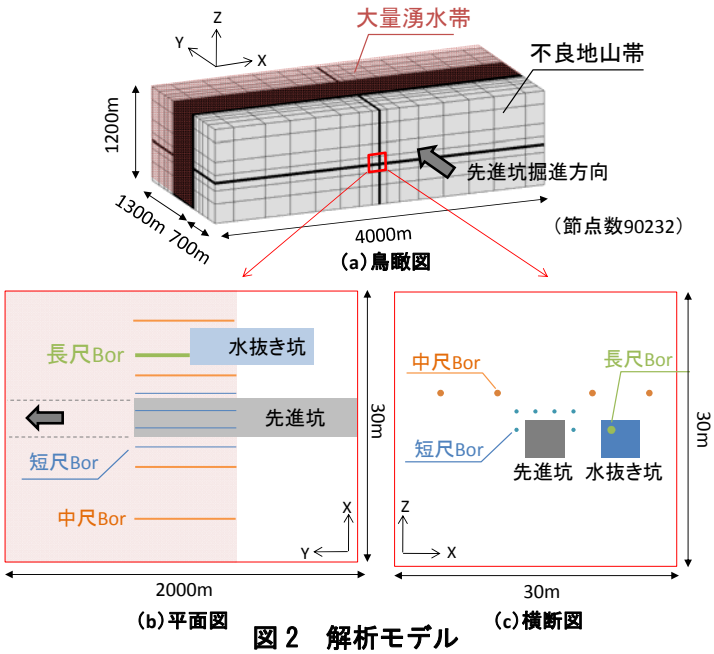

図 2　解析モデル

表 1　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

表 2　透水係数

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}

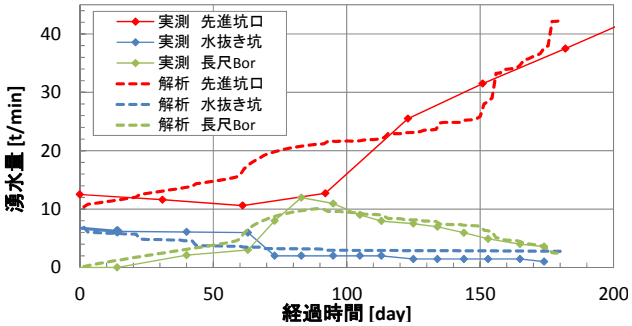

図 4　湧水量の実測と解析結果

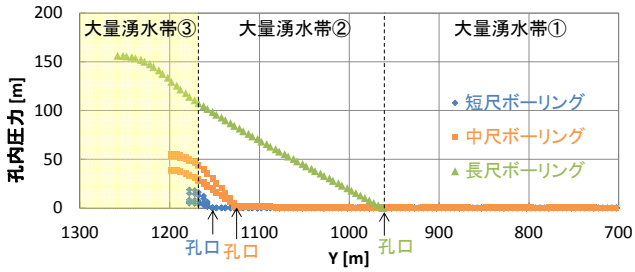

図 5　ボーリング孔内圧力分布

グ孔内壁の粗度は 3.0mm と仮定した．解析開始は水抜き坑掘削完了時からとし，1 時間ステップ長さを 1.5 日とした．先進坑は平均日進 3.1m とし，各時間ステップで掘削済部分の節点を大気圧固定する逐次掘削解析とした．長尺ボーリングは日進 3.3m，短尺・中尺ボーリングは先進坑がラップ位置に達した直後に 1 時間ステップ（1.5 日）で全長を削孔完了するものとした．ボーリング孔については，孔口節点のみを大気圧固定とし，孔内の圧力は上述の孔内流れモデルにより計算される．

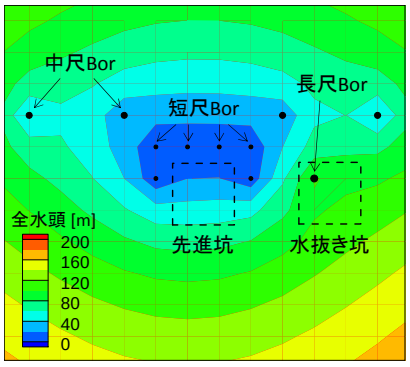

図 6　切羽周辺の全水頭コンター

5．再現解析の結果

解析結果を実測値とともに図 4 に示す．湧水量の時間変化は実測値と概ね一致している．流量が多い状態（各ボーリングの先端が大量湧水帯③に到達した時点）でのボーリング孔内圧力分布を図 5 に示す．いずれのボーリングも孔内の圧力水頭が大気圧まで低下せず，特に長尺ボーリング先端の圧力水頭は 150m にも達している．本解析より，削孔延長が長いほど圧力損失が大きくなり，十分な水抜き効果が得られないことが表現できることが分かる．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図 6 に示すが，切羽前方の水圧が 40m 程度まで低下している．今回の解析結果によれば，切羽近傍に設置された短尺ボーリングは圧力損失が小さく，その水抜き効果が大きかったものと推察される．

6．おわりに

本研究では，孔内圧力損失を考慮した地下水流動解析手法を開発し，飛騨トンネルの湧水対策の再現解析を行った．その結果，ボーリング孔内の圧力損失を定量的に計算できる本手法は，大量湧水時の水抜き対策効果の評価に有用であることが分かった．

参考文献

1) 寺田光太郎，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，第 35 巻 9 号，15-25，2004.