

水抜きボーリングの実績データを活用した SWING 法によるトンネルの湧水量予測

鹿島建設(株) 正会員 ○ 小泉 悠 正会員 川端 淳一

正会員 山本 拓治 正会員 岩野 圭太

パシフィックコンサルタンツ(株) 正会員 安田 亨

京都大学大学院 正会員 大西 有三

1. はじめに

トンネル工事における大量湧水の発生は、切羽の崩落や地下水位の低下を引き起こし、その後の施工やトンネル周辺の地下水流動に多大な影響を及ぼすことがある。そこで、地下水に関する情報化施工のツールとして、近年、SWING 法が開発された¹⁾。SWING 法では、3次元の浸透流数値解析などに比較して簡便な解析モデルを用いるため、施工中の実績データを解析にフィードバックさせながら、現場で迅速に湧水の発生や地下水位の低下を再現し、評価することができる。本報告では、SWING 法を実際のトンネル施工に適用するにあたり、水抜きボーリングの実績データを活用することによって、未掘削区間の透水係数を同定し、湧水量を精度よく予測する手法を提案した。そして、同手法を実際のトンネル施工に適用した事例について報告する。

2. SWING 法の課題および水抜きボーリングの実績データを活用した湧水量予測法

SWING 法の詳細については参考文献¹⁾をご参照頂きたい。概略を述べると、SWING 法ではトンネルを軸方向 50m 程度に区分し、単位区間の湧水量を式 1 から求める。そして、これらを足し合わせることで、既掘削区間の湧水量を算出する手法である。現場では、この計算値をトンネル坑口で実測される湧水量とフィッティングさせることで、単位区間の透水係数を逆解析し、あらかじめ設定した透水係数を修正しながら、既掘削区間の湧水状況を再現していく。一方、未掘削区間の湧水量については、実績データのフィードバック作業を繰り返すことで対象現場の湧水特性を把握し、徐々にその精度向上を図ることができる¹⁾が、実施工に反映する上で十分な精度を確保することは容易でない。そこで筆者らは、切羽前方の水抜きと地質調査を目的に施工される水平ボーリングに着目した。すなわち、水平ボーリングを先行トンネルとみなし、ボーリング孔からの湧水データに基づき、切羽前方の透水係数を同定する。そして、図-1 に示すように水抜きボーリングによる地下水位の低下を考慮した上で、同定した透水係数を用いて、切羽前方の湧水量をより精度よく予測することとした。なお、地下水位の低下量は、式 1 と同様に、Dupuit の準一様流の式から導かれる式 2 および式 3 により算出する。

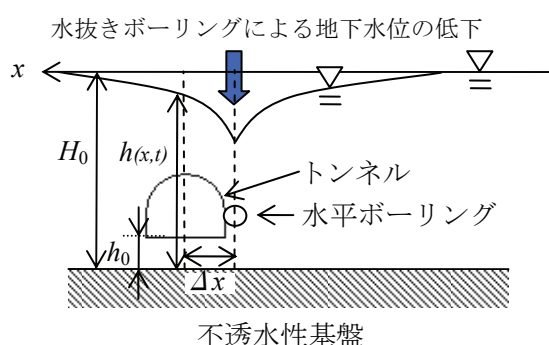


図-1 単位区間の断面図

$$q(t) = \frac{K(H_0^2 - h_0^2)}{2 \times \left(\frac{K(H_0^2 - h_0^2)}{2\varepsilon} \left\{ 1 - e^{-6\varepsilon/\lambda_e(H_0 - h_0)} \right\} \right)^{1/2}} \quad (1)$$

$$R(t) = \left(\frac{K(H_0^2 - h_0^2)}{2\varepsilon} \left\{ 1 - e^{-6\varepsilon/\lambda_e(H_0 - h_0)} \right\} \right)^{1/2} \quad (2)$$

$$h(x,t) = \left(\frac{\Delta x}{R(t)} (H_0^2 - h_0^2) + h_0^2 \right)^{1/2} \quad (3)$$

ここで、 $q(t)$: 湧水量(ℓ /分/m)、 K : 透水係数(m/s)、 H_0 、 h_0 、 $h(x,t)$: 地下水位(m) (図-1 参照)、 ε : 降雨浸透率(m/s)、 λ_e : 有効間隙率(%), $R(t)$: 地下水位低下区間長(m)である。

キーワード トンネル、湧水、SWING 法、水抜きボーリング

連絡先 〒182-0036 東京都調布市飛田給 2-19-1 鹿島建設(株) 技術研究所 TEL042-489-7706

3. 実トンネルへの適用

対象トンネルは、避難坑（掘削幅約 5.5m）を有する道路トンネルであり、緑色岩および砂岩・礫岩中に施工された。本工事では、断層想定位置の手前で、先進する避難坑切羽から斜め前方に向け、長さ約 80m の水平ボーリング（孔径 101mm）が施工された。沢部に入る手前の T.D.210m までで避難坑の坑内湧水量は 20ℓ/分程度とわずかであったが、T.D.210m での水平ボーリングの施工により、削孔長 20m で 45ℓ/分、40m で 415ℓ/分、60m で 700ℓ/分、80m で 1,080ℓ/分の湧水がボーリング孔の口元で実測された。その後、時間経過とともにボーリング孔からの湧水量は減少し、施工から 95 日後に枯渇した。これらの実績データを踏まえ、ボーリング長 80m を 20m×4 区間に区分し、透水係数および有効間隙率を変化させながら、SWING 法による計算値と実測値を図-2 に示すようにフィッティングさせた。同定された各区間の透水係数および有効間隙率を表-1 に示す。初期地下水頭および式 2 および式 3 から算出した避難坑通過時の地下水位 $h(x,t)$ を同じく表-1 に示した。この $h(x,t)$ を式 1 中の H_0 に代入計算することで、避難坑 T.D.210~290m の湧水量が求められる。計算を行うに当たり、斜め前方に削孔されたボーリング孔から避難坑センターまでの水平離隔が 2~15m であることから、式 3 中の Δx は 5m とした。また、式 1 に関し、避難坑掘削に伴う単位長さ当たりの湧水量を、ボーリングによる湧水量の 7 倍とすることで、図-3 に示すように、計算値が実測値と概ねよく整合した。避難坑掘削断面の周長はボーリング孔の約 50 倍あるが、水抜きによる周辺地下水圧の低下効果、吹き付けコンクリートによる避難坑周面の止水効果により、このような比率となったと考えられる。なお、式 1 中の H_0 に表-1 に示す初期地下水頭 H_0 を代入することで、水抜きせずに避難坑の掘削を継続したときの湧水状況が想定できると考えられる。この場合、計算上、避難坑 T.D.270~290m で、最大 3,000ℓ/分の大量湧水が発生する可能性があったことが分かった。このように本手法は、水抜きボーリングによる施工リスク低減効果の評価にも有効と考えられる。

4. まとめ

本報告では、SWING 法の現状の課題に対し、水抜きボーリングの実績データから切羽前方の透水係数を同定することで、未掘削区間の湧水量を精度よく予測する手法を提案した。そして、提案した手法を実トンネルに適用した結果、ボーリング長に相当する 80m の区間ではあるが、水抜き後に坑内で発生する湧水量を高い精度で予測できることを確認した。今後は水抜きボーリング周辺で地下水位を実測するなどして、検討事例および項目を増やし、さらなる予測精度の向上に努める所存である。

参考文献

1) 安田 亨：山岳トンネルの地下水情報化施工，トンネルと地下，Vol.40，No.8，pp.49-58，2009.

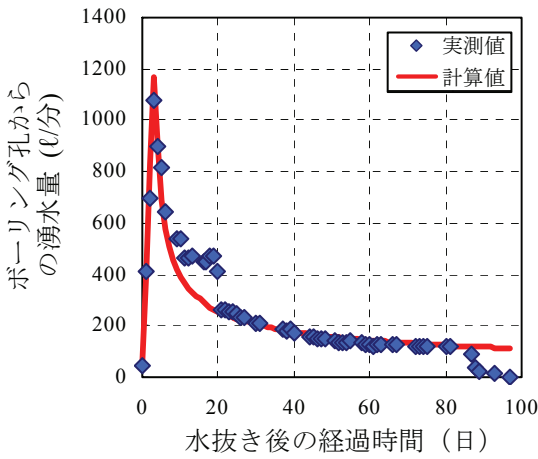


図-2 ボーリング孔からの湧水量と経過時間の関係

表-1 各区間の透水係数，有効間隙率および地下水頭

T.D. (m)	透水係数 (cm/s)	有効間隙率 (%)	地下水頭 (m)	
			初期 H_0	避難坑通過時 $h(x,t)$
150 ~ 210	5.0×10^{-8}	10	64.6	64.6
210 ~ 230	5.0×10^{-6}	10	71.8	70.8
230 ~ 250	1.0×10^{-4}	20	67.4	29.8
250 ~ 270	2.0×10^{-4}	25	60.4	23.1
270 ~ 290	3.5×10^{-4}	25	52.1	17.9

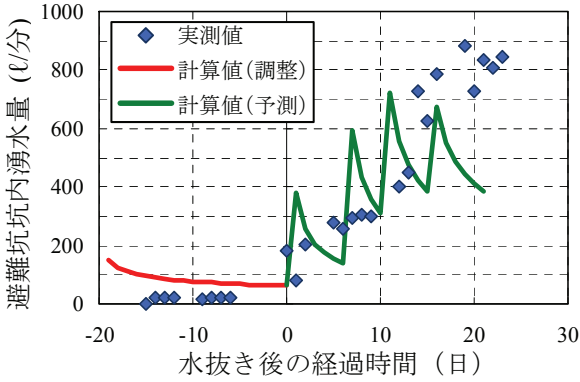


図-3 避難坑坑内湧水量と経過時間の関係