

多量湧水が想定されるトンネルでの地下水前方探査システムの開発

(株)大林組 生産技術本部トンネル技術部 正会員 ○伊藤 哲、木梨秀雄

(株)大林組 技術研究所地盤技術研究部 正会員 中岡健一

1. はじめに

大土被り・高水圧下の山岳トンネル工事においては、多量湧水や突発湧水に伴う切羽崩落などのリスクがある。そのため、事前に前方の地質や地下水の調査を実施することが有効であり、弊社ではこれまでに水圧ハンマによる高速ノンコア切羽前方探査システムを開発した。本研究ではこの切羽前方探査中に計測可能な地下水前方探査システムを構築した。これにより、多量湧水や突発湧水の位置と量を事前予測して、切羽到達時の不安定化を防止する。

2. 開発の概要

高速ノンコア切羽前方探査システムは、先端打撃方式の水圧ハンマにより、8時間でトンネル掘削1か月分の150m以上を施工できるものである。本研究ではボーリング前方探査中に湧水量および地下水頭を計測した。図-1に本システムの概要を示す。

ボーリング孔口に、口元管を設置し、止水性を有するメカニカルパッカーを用いることで、湧水とスライムの全量を確実に集水できる構造とした。湧水量計測は口元管排水部に電磁流量計を設置して、ボーリング中に常時計測する。また、地下水頭（湧水圧）は、ボーリング孔内にゴムパッカー（外径φ85）を挿入・拡張して、圧力計で計測を行う。計測データは、前方探査システムのデータロガーに、削孔速度などと同時に記録できるので、前方地山の予測と同時に管理できる。加えて、口元管はY字管で2方向に分岐させており、切り換え弁により削孔時にスライムを効率よく採取できる機構とした。

3. 現場実験

本システムを用いて、山岳トンネル現場において前方探査ボーリング施工時に湧水量と地下水頭の計測を行った。地山はチャート、砂岩・頁岩互層、土被り340～400m、弾性波速度4km/cm、設計支保パターンはCⅡ、前方探査の延長は165mである。

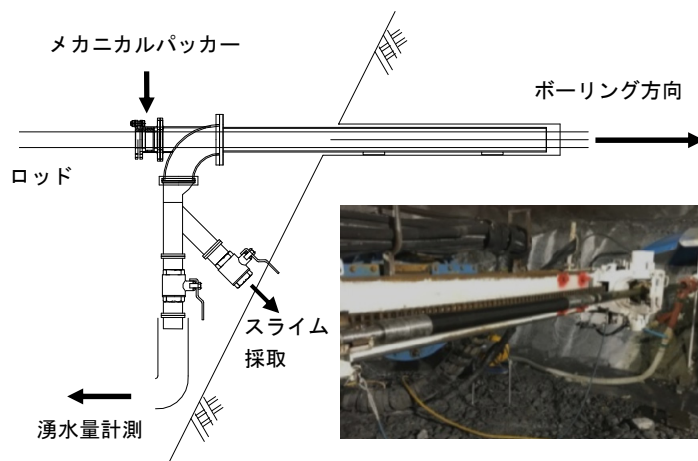


図-1 地下水前方予測システム概要

4. 計測結果

図-2 の上のグラフに前方探査ボーリングによる地山評価結果、下のグラフに湧水量・地下水頭（湧水圧）の測定結果を示す。図-2 で黒線はエネルギー指標値を示す。値が大きいほど地山が硬質で、これまでの実績から 1.25 以下の場合、脆弱の DⅡ 等級の脆弱な地山と評価する。

ボーリング長L=150m付近まではエネルギー指標値 1.25～7.0 の軟質～硬質な地山であるが、L=150m 付

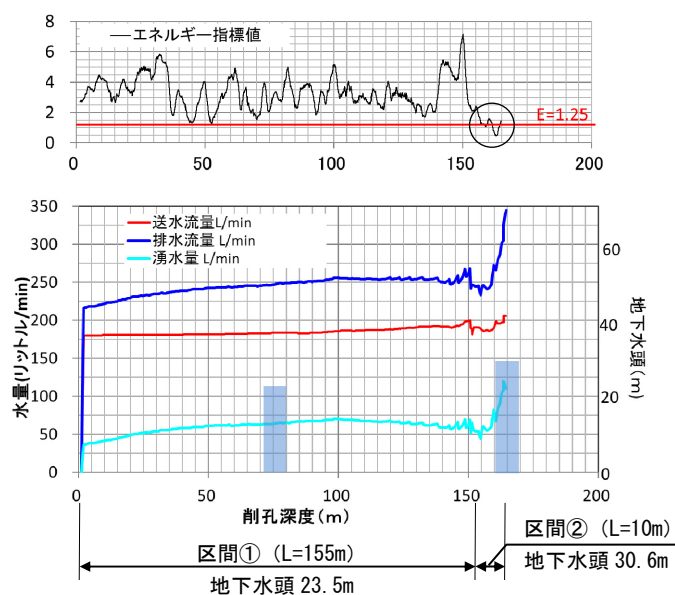


図-2 前方探査結果（上グラフ）と湧水量・地下水頭の計測結果（下グラフ）

キーワード 湧水量、地下水頭、湧水圧、前方探査、水抜きボーリング

連絡先 〒108-8502 東京都港区港南 2-15-2 品川インターシティ B 棟 TEL 03-5769-1319

近からエネルギー指標値が急激に低下して、1.25 以下の DII 級となり、湧水量が 70L/min から 120L/min 以上に増加した。流量を連続計測することで湧水箇所の特特定ができた。図-2 の棒グラフに地下水頭の計測結果を示す。地下水頭は、L=75m 付近と湧水急増した L=165m の 2 か所で計測した。L=75m では 0.23MPa (地下水頭で 23.5m 程度)、L=165m では 0.3MPa (地下水頭で 30.6m 程度) が確認できた。

5. 前方地山の湧水予測

上記の孔内湧水量と地下水頭の計測結果より、湧水発生個所に切羽が到達した時点での湧水量予測をした。

まず透水係数を Muskat の式¹⁾から算出した。

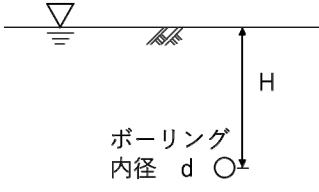
$$k = \frac{q \ln \frac{4H_0}{d}}{2\pi H_0}$$


図-3 Muskat の式

ここで、k: 透水係数、q: 単位幅あたりの湧水量、 H_0 : 地下水頭、d: ボーリング孔内径である。

計測結果から、図-2 のように、湧水箇所を区間①と区間②に区分して、各々で透水係数を算出した。区間①は区間長 $L=155\text{m}$ 、地下水頭 $H_0=23.5\text{m}$ 、 $q=70\text{L/min}$ 、区間②は $L=10\text{m}$ 、地下水頭 $H_0=30.6\text{m}$ 、 $q=120-70=50\text{L/min}$ とした。透水係数は、区間①で $3.6 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ 、区間②で $3.2 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ と算出された。

この透水係数を用いて、t 時間後の湧水量を Dupuit の準一様流の式²⁾により算出した。

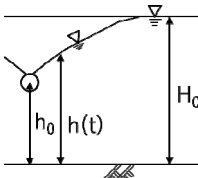
$$q = k \frac{(H_0^2 - h_0^2)}{2 \left[k \frac{(H_0^2 - h_0^2)}{2\varepsilon} (1 - e^{-6\pi/\lambda \varepsilon (H_0 - h_0)}) \right]^{1/2}}$$


図-4 Dupuit の準一様流の式

ここで、 h_0 : 基盤からトンネルまでの高さ、 λ : 有効間隙率、 ε : 降雨浸透率である。

図-5 に予測結果を示す。区間①、②とも時間の経過とともに湧水量が減少する。ボーリング時の湧水量は区間①と区間②の予測湧水量の合計で図の破線

である。切羽が30日後の480時間後に区間②の湧水発生箇所到達するとして、ボーリング孔の湧水量は、初期値の120L/minから、480時間後では1/10以下の10L/minとなると予測できた。表-1 にトンネル湧水量と地下水頭と透水係数の関係¹⁾を示す。本検討で予測した湧水量は、湧水区間②の範囲を10mとして、表-1 の湧水がある ($0.01\text{m}^3/\text{min}/\text{m}$) 場合の100L/minより小さい値であり、本検討では追加の水抜きボーリングなどは不要と判断できる。

表-1 トンネル湧水量と地下水頭と透水係数の関係

トンネル湧水量 ($\text{m}^3/\text{min}/\text{m}$)	地山の透水係数 (cm/s)		
	$H=100\text{m}$	$H=200\text{m}$	$H=300\text{m}$
湧水がある	0.01	1×10^{-4}	6×10^{-5}
多量湧水	0.05	5×10^{-3}	3×10^{-4}
異常出水	0.1	1×10^{-3}	6×10^{-4}

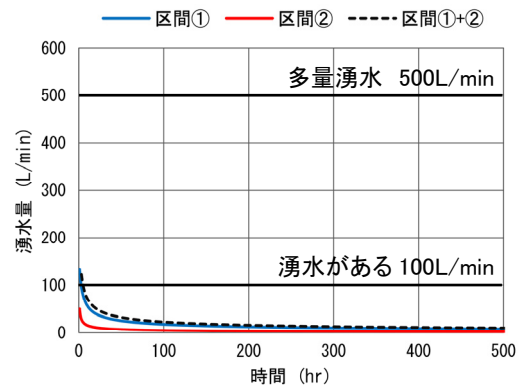


図-5 切羽到達時の湧水量の予測結果

6. まとめ

以下に本研究の成果をまとめる。

- ・流量の連続計測が可能であり、これにより湧水区間を特定できる。
- ・連続計測で特定した湧水発生箇所、地下水頭を計測できる。パッカー方式のシステムであり、湧水発生時にボーリングロッドへ接続して計測ができる。
- ・これら計測により、経時的な前方地山の湧水量変化を予測できる。今後は、多量湧水区間に適用し、水抜きボーリングなどの対策工の検討を行う。

参考文献

- 1) 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、pp.19-54、No.23、2003.
- 2) 佐藤邦明：山岳トンネル地下水のモデル化とシミュレーション手法の応用、応用地質、pp.50-56、vol.23、No.3、1982.