

高水圧トンネルを安全に施工するための水抜き工の設計法の提案

鹿島建設(株) 正会員 ○小泉 悠 川端 淳一
 升元 一彦 渥美 博行

1. はじめに

地下水位が高い地山を対象にトンネルを施工する場合、突発湧水やそれに伴う切羽崩落の発生リスクが高まる。そこで、このような高水圧トンネルを安全に施工するためには、水抜き工によって切羽周辺の水圧を低減させる必要がある。水抜き工としては、通常、トンネル坑内から切羽前方に向けて、水抜きボーリングが施工される。より多くの水を抜く必要がある場合は、水抜き用のトンネル(水抜坑)が施工されることもある。これら水抜き工の設計(適切な実施数量の決定)は、従来、既往の施工実績等に基づいて行われ、確立された合理的な設計検討フローは存在しなかった。バルクヘッドモデルと水理公式を組み合わせることで、水抜き工の設計検討フローを考案したので、ここに報告する。

2. バルクヘッドモデルによる動水勾配の管理

水圧に対する切羽の安定性を評価する簡易計算法として、バルクヘッドモデル¹⁾(図-1 参照)が挙げられる。本手法では、式(1)により地下水圧による浸透力を、式(2)により地山の粘着力 c (kN/m²) 及び内部摩擦角 ϕ (deg) による地山の抵抗力を求める。そして、式(3)に示すように、両者の比により切羽の安全率を求めるものである。施工対象となる地山の物性を想定し、必要な安全率を満たす限界動水勾配 i_c を設定する。地山条件が特に悪い場合、粘着力 c を 0 とし、動水勾配は 1 以下に管理されることが多い。

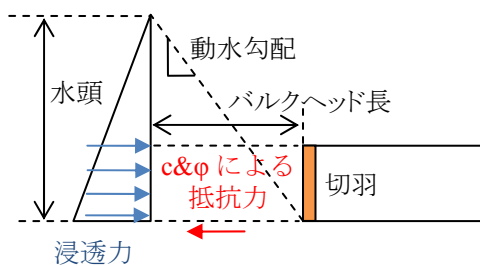


図-1 バルクヘッドモデルの概要

$$\text{浸透力 (kN)} : P_w = \gamma_w \cdot h_w \cdot a^2 \quad (1)$$

$$\text{抵抗力 (kN)} : F = \gamma' \cdot (4h_r + 2a) \cdot \tan \phi \cdot a \cdot L + 4a \cdot L \cdot c \quad (2)$$

$$\text{安全率} : FOS = \frac{F}{P_w} \quad (3)$$

$$\text{動水勾配} : i = \frac{h_w}{L} = \frac{2a \cdot \gamma' \cdot \tan \phi + 4c}{a \cdot \gamma_w} \cdot \frac{1}{FOS} \quad (4)$$

$\uparrow$
 $h_r=0$

ここで、 γ_w は水の単位体積重量 (kN/m³)、 γ' は地山の水中単位体積重量 (kN/m³)、 h_w は水頭 (m)、 a はトンネル断面形状を正方形としたときの一边の長さ (m)、 L はバルクヘッド長 (m) である。 h_r は土被り (m) で、地山の抵抗力増加に寄与するものの、今回の検討では 0 を代入して安全側の計算を行った。

3. 2次元水理公式による動水勾配コンターの算出法

水抜き工を要する状況として、切羽前方に高水圧下にある断層が存在する検討モデル(図-2 参照)を想定した。同モデルに対し、本報告で提案する水抜き工の設計検討フローを図-3 に示す。同図に示される水理公式①は以下に示す式(5)であり、水理公式②は式(6)である。いずれも地下水ハンドブック²⁾に記される「水抜孔が配置されたトンネル周辺の流れ」に関する2次元水理公式を、一部簡略化したものである。

$$H = \sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{2\pi k} \log \frac{H}{r_i} - \sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{2\pi k} \log \frac{\sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}}{r_i} \quad (5)$$

$$h_w = H - \sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{4\pi k} \log \frac{H^2}{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} \quad (6)$$

キーワード 高水圧トンネル、水抜き工、動水勾配

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 岩盤・地下水 Gr. TEL042-489-6668

ここで H は初期水頭 (m), k は透水係数 (m/s), n は水抜きボーリング孔数, l は水抜きボーリング長 (m), r は水抜きボーリング孔の半径 (m) である。 Σ' は $i=j$ を除いた総和を示す。式 (5) に示される n 次の連立方程式を解き、既知である初期水頭から各ボーリング孔での水抜き量 Q_i (m^3/s) が求められる。次に、これら Q_i を式 (6) に代入することで、水抜きボーリングにより低下する、トンネル掘削予定位置近傍の任意の点 (x, y) の水頭が求められ、バルクヘッド長で除すことで動水勾配に換算できる。図-3 に示すように、水抜きボーリング (必要に応じて、水抜き坑を追加する) の本数及び位置を設定し、トンネル掘削予定位置の動水勾配が管理値以下となるまで計算を繰り返すことで、水抜き工の設計検討が完了する。

4. 高水圧トンネルを対象とした設計検討事例

以上のフローに従って、水頭 400m 下 (=水圧 4MPa) での水抜き工の設計検討を行った。DII 級の断層として $c=100\text{kN/m}^2$, $\phi=30^\circ$ を想定し、安全率は 1.7 として、式 (4) により動水勾配の管理値を 3 以下と定めた。なお、透水係数は $1 \times 10^{-5} \text{m/s}$, ボーリング長 (破碎帯幅と同じと想定) は 10m, ボーリング孔径は 100mm とした。

結果の一例を図-4 に示す。初めに水抜きボーリング本数を 4 本としたところ、トンネル掘削範囲の動水勾配は 3~5 の範囲 (図-4 (a) 参照) となり、動水勾配を 3 以下に低減できなかった。そこで、ボーリング本数を 8 本に増やした結果、トンネル掘削範囲の動水勾配は 3 以下 (図-4 (b) 参照) となり、このボーリングレイアウトにより、高水圧下にある切羽前方の断層に対して安全にトンネルを施工できると考えた。

5. まとめ

従来、高水圧トンネルの水抜き工の設計は、既往の施工実績等に基づいて行われ、定められた設計手法が存在していたとは言えなかった。本報告では、バルクヘッドモデルと 2 次元水理公式を組み合わせた設計検討フローを提案した。今後の安全な施工の一助となれば幸いである。

参考文献

- 1) 依田淳一, 越川俊幸: 火砕岩類の高圧湧水帯を水抜きボーリングで突破 —北陸新幹線 高社山トンネル北工区—, トンネルと地下, 第 35 巻 2 号, pp.95~100, 2004.
- 2) 中澤式仁ほか: 改訂 地下水ハンドブック, 建設産業調査会, pp.94~95, 1998.

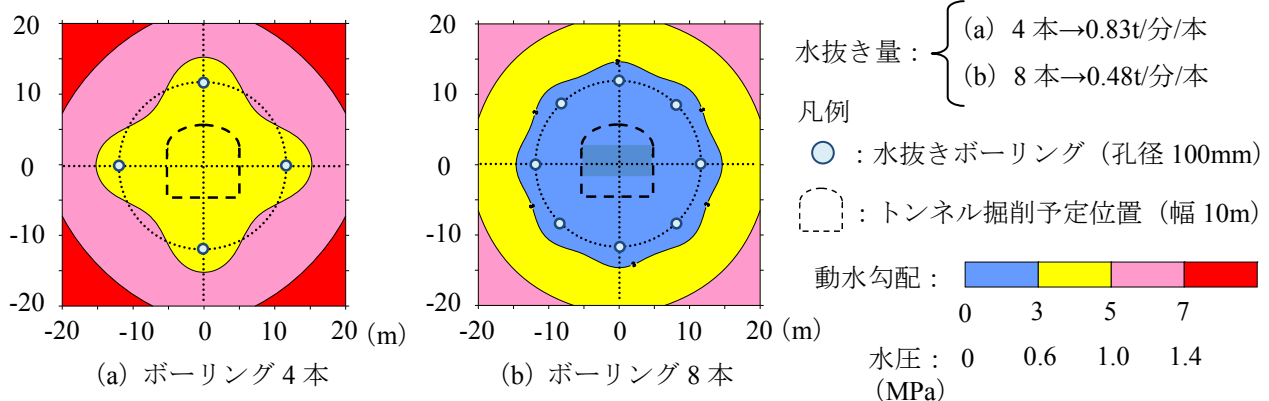


図-4 断層位置での動水勾配コンター

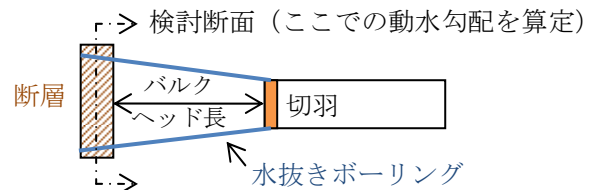


図-2 水抜き工設計検討モデル 平面図

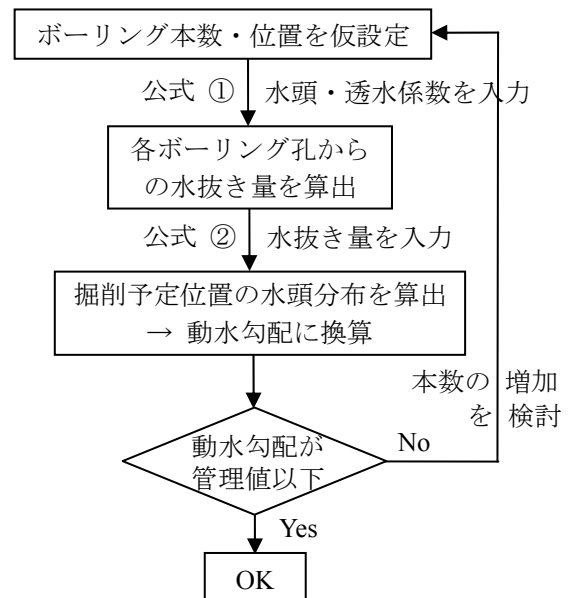


図-3 水抜き工の設計検討フロー