

トンネル施工に伴う湧水濁水対策に関する調査研究（その2）報告書（抜粋） （昭和58年2月 社団法人トンネル技術協会）

2.4.3 従来の予測手法

(1) トンネル湧水量と集水範囲

トンネル湧水は、施工中の集中湧水と竣工後の恒常湧水とに分類できる。施工中の集中湧水は、地盤中に貯留された地下水がトンネル内へ流出してくるものであり、初期流出量は大きい。次第に減少してゆき、ほぼ定常的な湧水量に収束する。竣工後の恒常湧水とは、集中湧水後のほぼ定常的な湧水で、降雨等による補給水量とトンネル湧水量とがバランスした状態での湧水である。集水範囲とは、トンネル湧水を補給する範囲であり、この範囲も、トンネル湧水に伴って、経時的に拡大してゆき、トンネル湧水と地表からの補給水量がバランスした所で、ほぼ一定となる。このように、トンネル湧水量と集水範囲は、経時的に変化し、ある一定状態に近づいてバランスするのが一般特性である。したがって、トンネル湧水量と集水範囲を予測する場合、

- a) 施工中の集中湧水量（初期流出量とその経時変化に伴う減衰状況）
- b) 竣工後の恒常湧水量
- c) 恒常湧水時の集水範囲

とに分けて考えた方がわかりやすい。

トンネルの湧水量と集水範囲に関する従来の予測手法は、

- ① 水理公式によるもの
- ② 水文学・水理学および地質学的方法により集水範囲を求め、河川の濁水比流量から恒常湧水量を予測する高橋の方法

に大別される。①の水理公式による予測手法は、a) 施工中の集中湧水量、および、b) 竣工後の恒常湧水量との予測に利用できるが、各々の式は、その式によって適用条件があり、対象とする地盤がどの条件に該当するかを考えて、妥当な式を選ぶ必要がある。また、これらの水理公式では、水位・透水係数・影響範囲が重要な要素であるが、これらの決定が容易でなく、一般には、ある程度仮定して計算するケースが多いようである。②の高橋の方法は、b) 竣工後の恒常湧水量、および、c) 恒常湧水時の集水範囲を予測するものであり、①の水理公式よりもはるかに現実の条件をとりこんだもので、諸数値も比較的容易に得られるため、かなり一般化しており、使用上の基本条件を誤らなければ、大勢を誤ることのない方法といえる。また、最近では、①の水理公式による方法ではなく、有限要素法等の数値解析手法により、より複雑な地盤中の浸透状況を解析できるようになってきたが、山岳トンネルの湧水では、地下水の賦存する地質や地質構造の複雑さから、その利用はなかなかむずかしいのが現状であるが、2.4.4で述べる水収支シミュレーションによる予測手法は、今後有効な予測手法となると思われる。

ここでは、a) b) c) の予測対象に関して、①および②の予測手法を簡単に説明するが、より精度の高い予測を行なうような場合には調査坑、あるいは水平ボーリングを実施し、湧水量と水位低下量・影響範囲との関係を求め、①あるいは②の予測手法と対比して適用していくのが、より有効な方法である。

(a) 施工中の集中湧水量

集中湧水とは、前述したように掘さく中の非定常的な湧水である。トンネル切羽における集中湧水量は、図 2.4.22 に示すように、帯水層に開孔した瞬間における初期湧水量（ q_0 ）

は大きく、流出時間の経過に従って、湧水量が減衰するのが一般的特性である。集中湧水量の予測式としては、表 2.4.8 に示すように、初期湧水量、およびその減衰曲線をあらわす水理公式、あるいは切羽湧水量を求める水理公式が種々提案されている。

初期湧水量 (q_0) の予測に関しては、地下水位、帯水層の性状および静水圧状態によって定まる境界条件が明らかであれば、水理学的手法によって容易に解析することができる。たとえば、表 2.4.8 に示す流線網の方法は、全体的な流れを直視的に、かつ総合的に認知することができるという特徴があり、広く利用されている。また、切羽湧水量の予測式としては表 2.4.8 に示すように、定常時の井戸公式の応用としての算定式である。

次に、集中湧水の減衰曲線をあらわす式としては、表 2.4.8 に示すヤコブ(石井)の式、および生方の式があるが、生方の式は自由水面の場合に適用されるものであり、ヤコブ(石井)の式は、被圧水の場合の集中湧水の性質をよく現わしているといえる。しかし、切羽のトンネル湧水の減衰曲線は、帯水層に対する最初の開孔が、透水断面が完全かつ不変の状態に形成されることはまれであることから、きわめて不規則な形状を示す場合が多く、また、実際のトンネル湧水の減衰曲線は、図 2.4.23 に示すように、ある地点における湧水量が十分平衡状態に達しないうちに掘削が進められるので、常に平衡流よりは多量の湧水を見ることになる。

以上、トンネルの集中湧水量に関する予測式について述べたが、現段階では、むしろ問題は量ではなく、集中湧水ケ所を予測する方が現実的な問題である。なぜなら、位置が予測できればその手前まで掘ざくし、先進ボーリングなどの施工中の調査により量に対する対策はある程度可能であるからである。

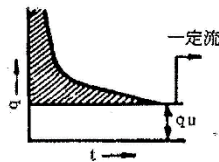


図 2.4.2.2 切羽における集中湧水の標準的減衰曲線

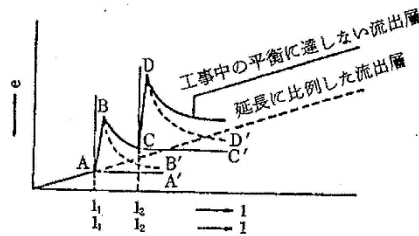


図 2.4.2.3 掘削中のトンネル湧水量

(注) BB', DD' はそれぞれ A, C 切端におけるトンネル湧水が、切端が進まない場合に現われる自然減衰曲線


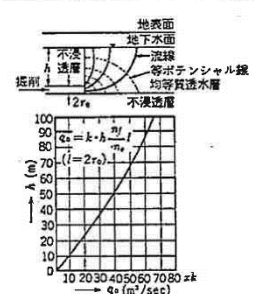
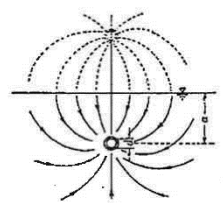
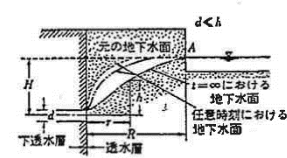
(b) 竣工後の恒常湧水量

竣工後の恒常湧水量とは、水中湧水後の定常的な湧水量であり、この予測手段としては、

- ① 水理公式(集中暗渠の式)により求める方法
- ② 湧水比流量、あるいは地表水の地下への浸透量から求める方法

などがある。

表 2.4.8 集中湧水の予測式一覧表

適用条件	算定式	参考図	備考
水がまだ流動しない状態、または、正に流動を始めようとする状態(この場合、流量は、帯水層の透水性に関係なく水圧と開口断面のみによって定まる。	$q_0 = v \cdot A$ $v = \sqrt{2gh}$ ここに v : 流速, h : 水頭 g : 重力の加速度 A : 開口部の断面積		多孔質媒体を通して行われる透水現象においては実在しない。
流線網の方法(垂直界面を通して均等質帯水層への開口によって現われる初期流出量は、地下水面よりトンネル天端までの深さ(h)によって標準的に求めておくことが可能である。図の場合は、掘削断面が $2r_0 \times 2r_0 = 4 \times 4\text{m}$ の場合についての大略の値を示したものである。	$q_0 = k \cdot h \cdot \frac{nr}{n_0} \cdot \delta$ ここに, k : 透水係数 h : 地下水面から掘削上面までの高さ δ : 単位区間長($= 2r_0$) nr : 流線によって切られる網目数 n_0 : 等ポテンシャル線によって切られる網目数	 <p>トンネル断面 $= 2r_0 = 2r_0 = 4 \times 4\text{m}$ の場合</p>	不透水層の位置がトンネル下底と一致しない、それより低い位置にある場合には、下方よりの流出が付加されるので流量が増加することになるが、この種の推定方法においては、致命的なものとならないと考えられる。
トンネルの中心からの a の高さに水平な等ポテンシャル線をおき、それを越して流入する流量(地表面近くまで貯留されていた水が一時にトンネルに向けて流出するような初期の状態の湧水)	$Q = 2\pi k \frac{a}{\ln 4 \frac{a}{d}}$ ここに, k : 透水係数 a : 水頭 d : トンネルの径		
チームの井戸公式の応用、(井戸開口からの湧水をトンネル坑内を通過する量に対応させ、影響範囲を井戸のその半分として利用)	$Q = \frac{\pi k (H^2 - h_0^2)}{4.61 \log R/r}$ ここに, h_0 : トンネル内の水位 R : 影響範囲 H : 水頭 k : 透水係数		自由地下水にある場合に適用
井戸公式の応用(切羽からの湧水量を井戸が平担で、かつ井底だけから湧水するものとした場合)	$Q = 4kT_0 H_0$ ここに, r_0 : トンネル半径 H_0 : トンネル半径から最高静水位 k : 透水係数		自由地下水にある場合に適用
自由水面下における非帯水層(泥岩類)中にある破砕帯や割れ目などよりの湧水量	$Q = \frac{\pi k (H^2 - h_0^2)}{4.61 \log (R^2 / r D_0)}$ ここに, D_0 : 破砕帯の有効巾		
ヤコブの公式……グリス・野満の非常常井戸公式から出発した近似解、切羽の非常常湧水量の推定に適用可能。被圧水の場合に適用	$Q_t = 4\pi T \cdot \frac{(C - P/W)}{\delta n 2.25 T t / r^2 \cdot S}$ $q_t = q_0 \left(1 - \sqrt{\frac{2R}{R^2 + 4H^2} - R} \right) \left\{ 1 - \frac{\sqrt{R^2 + 4H^2}}{R^2 + (2H + \frac{1}{\lambda} z)^2} \right\}$ ここに t : 時間における切羽湧水量 r : 切羽からの距離 S : 貯留係数 T : 透水量係数 $k \cdot b$ (b : 透水層厚) C : r の位置における水位低下量 P : 切羽からの自噴圧力 δ : 切羽解放時点からの経過時間 W : 水の単位重量 z : 流出開始後の経過時間 λ : 開けき率 q_0 : 初期流出量 H : 水頭 R : 影響範囲		t を ∞ に近づけて行けば、平衡状態に近づいて行く。石井は、 $C - P/W = H$: 被圧水頭 r : トンネル半径として、近似させ、高被圧帯水層の集中湧水の予測式としている。
生方式…… q_0 の時間的減衰に関して、右図のように、 R と H を固定した状態における提案式、自由水面の場合に適用	$q_t = q_0 \left(1 - \sqrt{\frac{2R}{R^2 + 4H^2} - R} \right) \left\{ 1 - \frac{\sqrt{R^2 + 4H^2}}{R^2 + (2H + \frac{1}{\lambda} z)^2} \right\}$ ここに t : 流出開始後の経過時間 λ : 開けき率 q_0 : 初期流出量 H : 水頭 R : 影響範囲		t を ∞ に近づけて行けば平衡状態に近づいて行く。透水係数が大きく、かつ、 R が小さい場合に適用される ($k = 1 \times 10^{-2} \sim 10^{-2} \text{ cm/sec}$, $R = 10 \sim 50\text{m}$)