

山中のトンネル掘削の先端付近(切り羽)での湧水現象について

視覚的な理解のためのご説明

— 科学的・工学的根拠に基づく対話が円滑に進むために —

2023年6月6日

難波喬司

静岡理工科大学 大学院理工学研究科 客員教授 ・ 博士(工学)

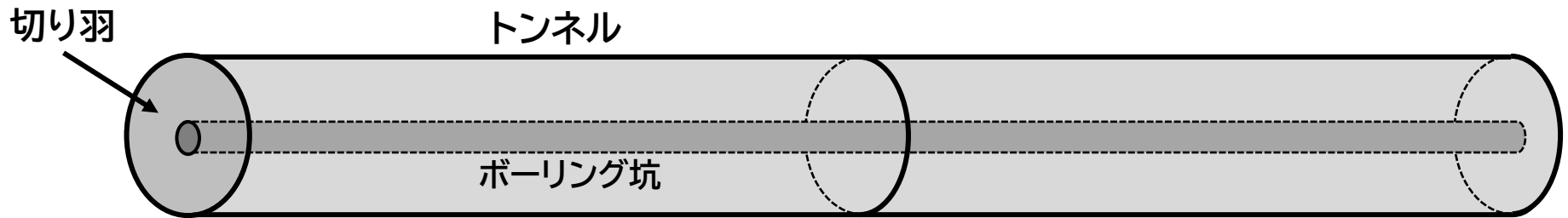
筆者は、静岡県職員時代に、静岡県の専門部会において、トンネル切り羽付近の湧水問題について、科学的根拠に基づき、問題提起した。

現在、高速長尺先進ボーリングの取り扱いについて、県とJR東海間で対話が行われているが、両者間の認識に差異があるように感じられ、また、両者の認識と、私自身の認識の間にも差異がある。

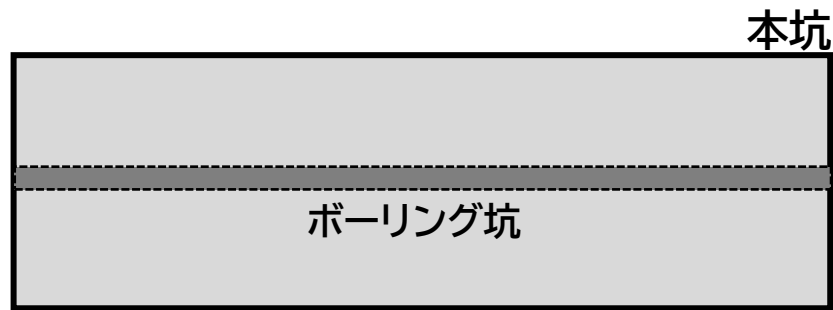
今後、健全な科学的根拠に基づく健全な対話が進むことを願い、技術者として、本資料をまとめた。

現在、筆者は静岡市長を務めているが、本資料は、あくまで一技術者としての見解であることを申し添える。

科学的対話で重要なこと・・・同じ土俵の上での対話



トンネルを上下から見ると



本坑・ボーリング坑のどちらも長い長方形

⇒ トンネル壁面からの湧水量の推定

JR東海・静岡県の視点



かみ合わない

トンネルの切り羽部分をトンネル進行方向から見ると



本坑・ボーリング坑のどちらも丸

⇒ 切り羽断面からの湧水量の推定

難波の視点

土俵が異なる



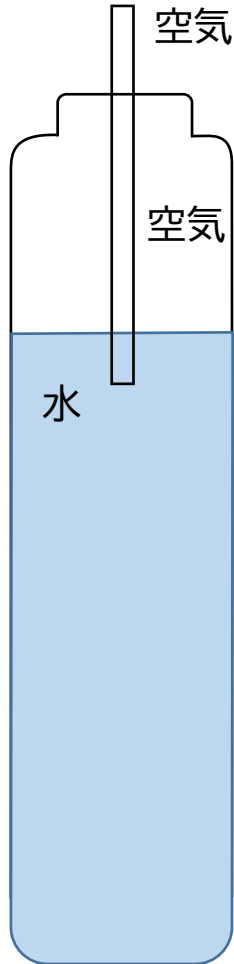
かみ合わない

両者は同じ視点だが、見ている時間の長さが異なる

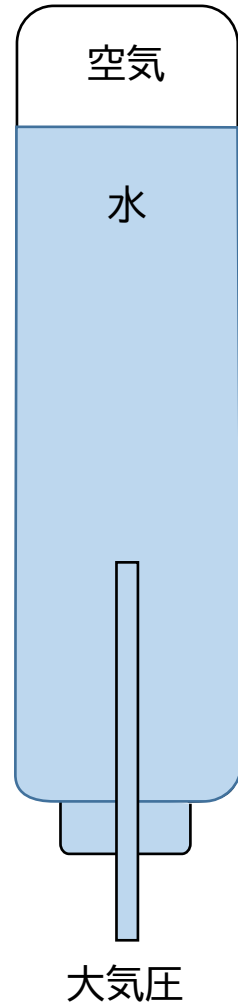
⇒ 同じ土俵の上での対話となっていない

トンネル湧水の形：現象①・・・岩中の切れ目にある水のトンネル側面への湧水

もとの状態



ペットボトルの上下を逆にする

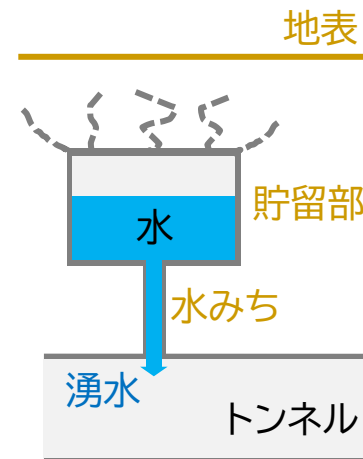


○ペットボトルから出る水
ストローの先端から最初少し水が出るが、その後は出ない。

(理由)

ペットボトル内の空気圧が下がって、水がストローから出るのを引っ張り上げる。

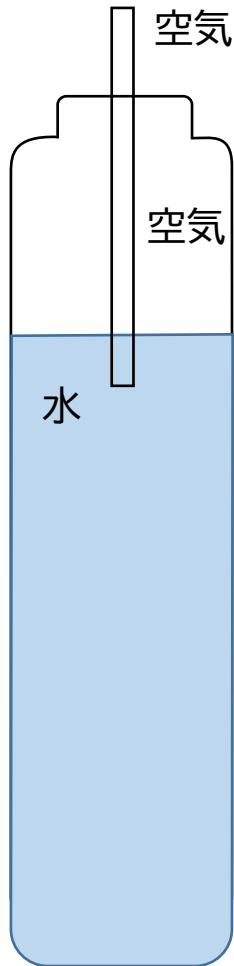
○トンネルを掘ったときに山中で起きる現象
トンネル近傍にある岩中の切れ目にある水が少し出るが、その水のもとの場所に、岩中から新たな水や空気はすぐには供給されないため、岩中の空気圧または水圧が下がって、切れ目からトンネルへ湧水する量が減る。



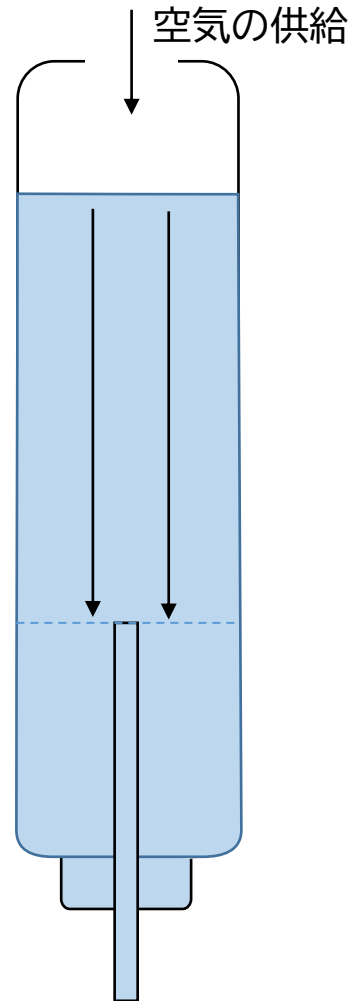
(注)本説明は、視覚的理解のしやすさを重視した結果、科学的正確性の点では、実現象とやや異なるところがある。

トンネル湧水の形：現象② ... 岩中の水みちが太く、地表とつながっている場所からの水の湧水

もとの状態



ペットボトルの水



○ペットボトルから出る水

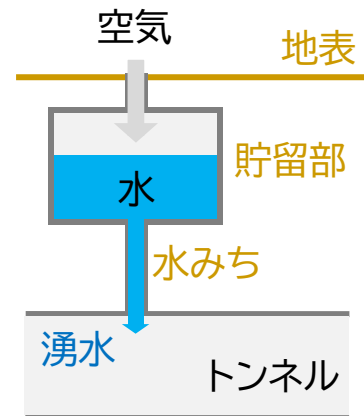
ペットボトルの中の水位がストローの上端の高さになるまで出る。

○地上と水みちがつながっているところで、トンネルを掘ったときに山中で起きる現象
トンネル内に大量の湧水が生じる。

(ただし、山中の実現象では、山中の水の流れ、とりわけ、遠くの水は、トンネル部分まで流れ込んでくるのに時間がかかるので、いつまでも勢いよく水が流れ出るわけではない。)

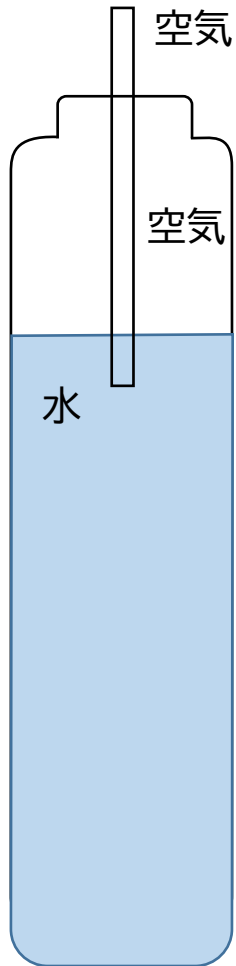
(実際の現象)

初期湧水量 大 → 中 → 小 へ
(時間とともに)

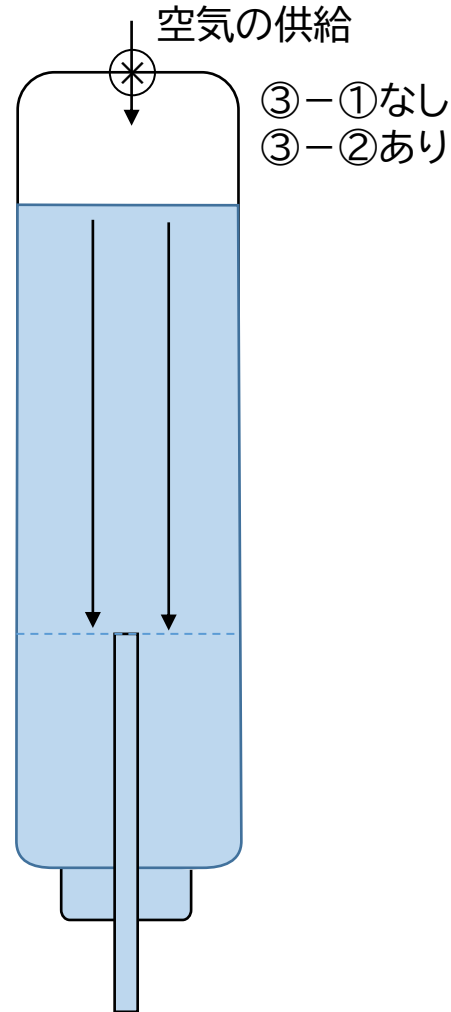


トンネル湧水の形：現象③・・・トンネル切り羽(輪切りの断面)からの湧水

もとの状態



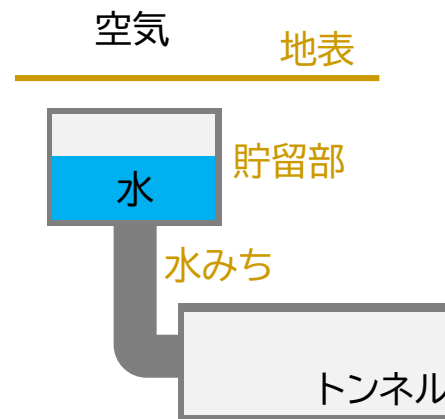
ペットボトルの水



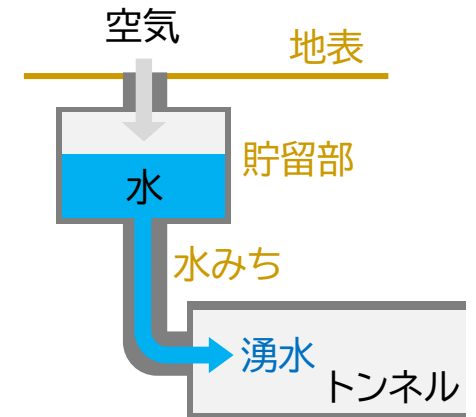
現象①②が切り羽の断面で生じる

- 現象③-① ペットボトルの水はあまり出ない
- 現象③-② ペットボトルの水は勢いよく出る

現象③-①



現象③-②



県・JR東海が用いている計算方法・・・現象②のときのトンネル湧水量の計算方法

計算方法の

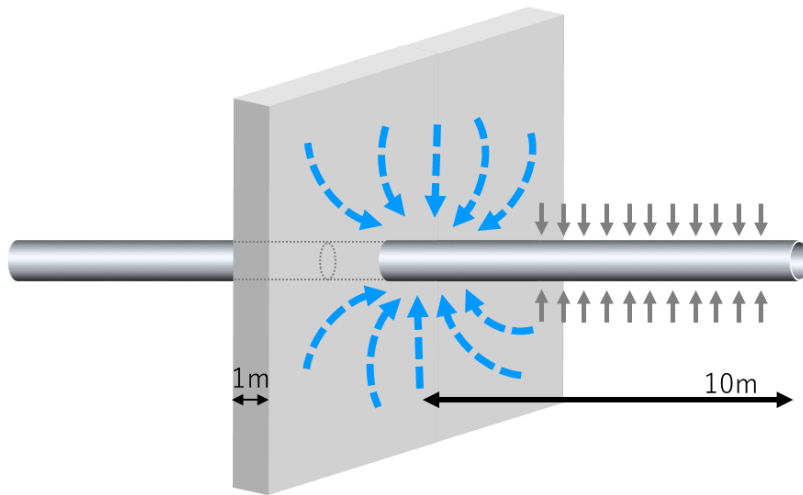
(仮定1)
一様な土と水の状態

(仮定2)
トンネル内へ湧水した分、水は同じ断面の遠くから(無限に)運ばれてくる

(仮定3)
土中を水が通るため水の流れは抵抗を受ける(透水係数で表現)

計算しているもの

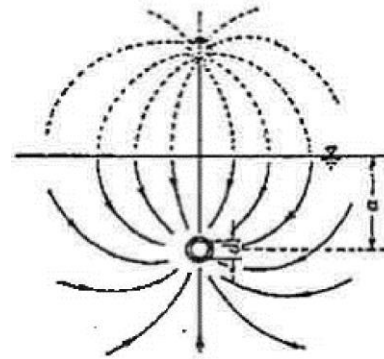
ある断面(幅1m)のトンネルの側面からの湧水量 × 長さ = ある区間(10m)の湧水量



計算式

$$Q = 2\pi k \frac{H}{\ln \frac{4H}{d}}$$

k = 湧水係数
H = 水頭
d = トンネルの径



出典
「トンネル施工に伴う湧水湧水対策に関する調査研究(その2)報告書」
(昭和58年2月 社団法人トンネル技術協会)
P.153
表2.4.8
集中湧水の予測式一覧表

JR東海による計算結果:

平成31年3月13日「静岡県中央新幹線環境保全連絡会議地質構造・水資源専門部会」において提示した管理値を準用し、以下により算出しました。

$$q = 2\pi \cdot K \cdot H / \ln(4H/d)$$

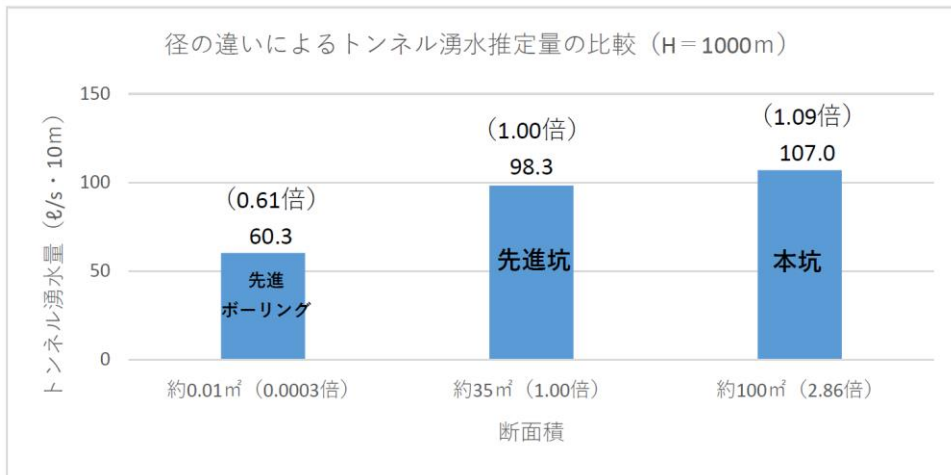
q: 単位当り湧水量(m³/秒・m)、K: 透水係数 = 1.0 × 10⁻⁵ m/sec、H: 水頭差(ヘッド) = 山梨・静岡県境付近の最大土被り1,000m、
d: トンネル直径 = 0.12m(先進ボーリング径)

$$10m \text{ あたり } Q = q \times 10 \doteq 0.006 \text{ m}^3/\text{秒} \cdot \text{m} \times 10 \text{ m} = 0.06 \text{ m}^3/\text{秒}$$

県による計算結果・・・トンネルの断面の大小によって湧水量はあまり変わらない

静岡県試算

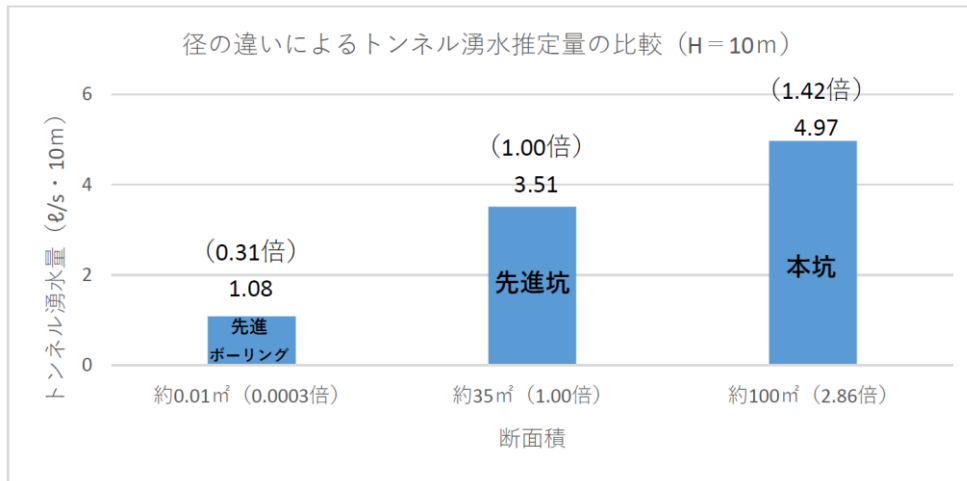
◎水頭差 (H) が1000mの場合



(出典：R5.3.20 第12回地質構造・水資源専門部会 資料3-3)

(参考)静岡県環境局が追加試算

◎水頭差 (H) が10mの場合



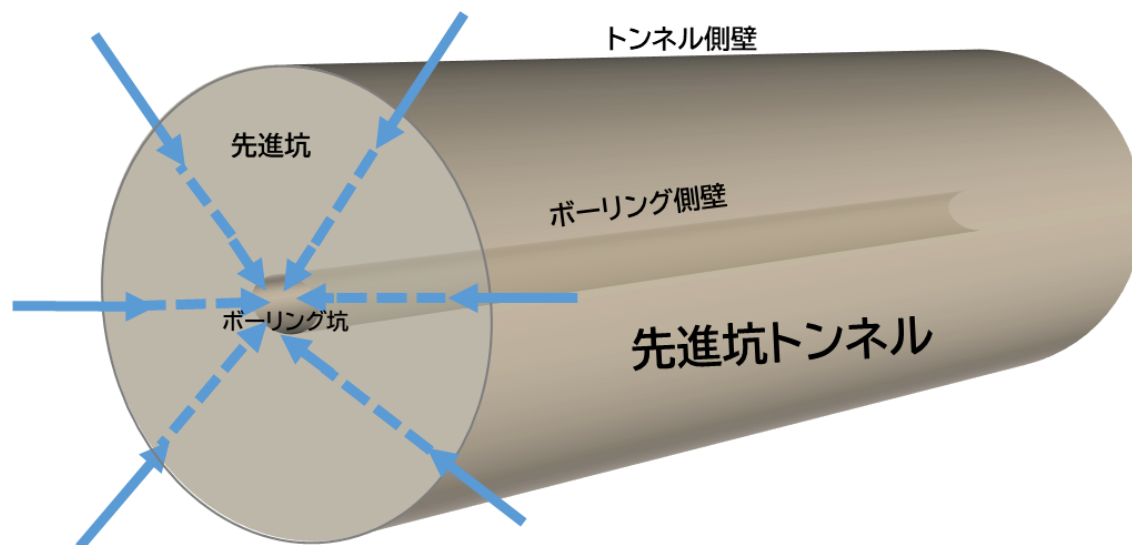
水頭差が、1000mから10mと1/10になると、先進ボーリング坑の湧水量は、31%まで減少する。

⇒ 「1000mの水頭差の場合、管(トンネル坑)への湧水量は、100㎡の断面と0.01㎡の断面であまり変わらない(先進坑の湧水量に比べて、ボーリング坑のそれは61%)」というのには直感的に理解しにくいのだが・・・この計算式の考え方は？

(注)10mの水頭差で計算しても、先進坑湧水量に比べて、ボーリング坑のそれは31%

県による計算結果・・・トンネルの断面の大小によっても湧水量はあまり変わらない理由

計算結果の視覚的理解



「高水圧が先進坑の側壁に突きささる量」と「高水圧がボーリング坑の側面に突きささる量」はほとんど変わらない

⇒ 示唆されること

ボーリング坑が小さいからといって、湧水量をあなどってはいけない。

⇒ 注意事項(この計算方法の適用範囲と限界)

① 「周辺の岩中は一様な状態で、遠くから無限に水が供給される」との仮定のもとでの計算。実際には、遠くからの水の供給量には限界がある。

② この計算は、切り羽からの湧水量を計算する式ではない。(側壁からの湧水量を計算している)

⇒ JR東海は、初期湧水量の計算方法と説明。(なんばの理解：誤りではないが・・・)

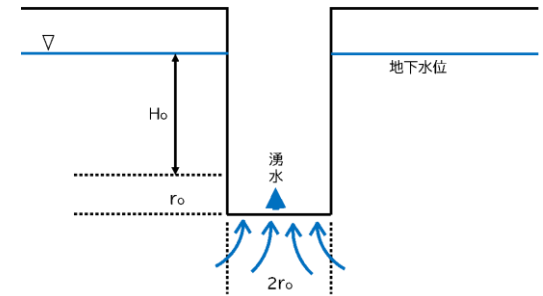
難波が推奨する計算方法・・・切り羽湧水量の計算式

計算方法（直感的理解のために最も単純な方法を用いる）湧水量は、トンネル半径に単純に比例する。

（計算の仮定）井戸公式の応用（切り羽からの湧水量を「井戸が平坦で、かつ井底だけから揚水するものと同様」と仮定した計算

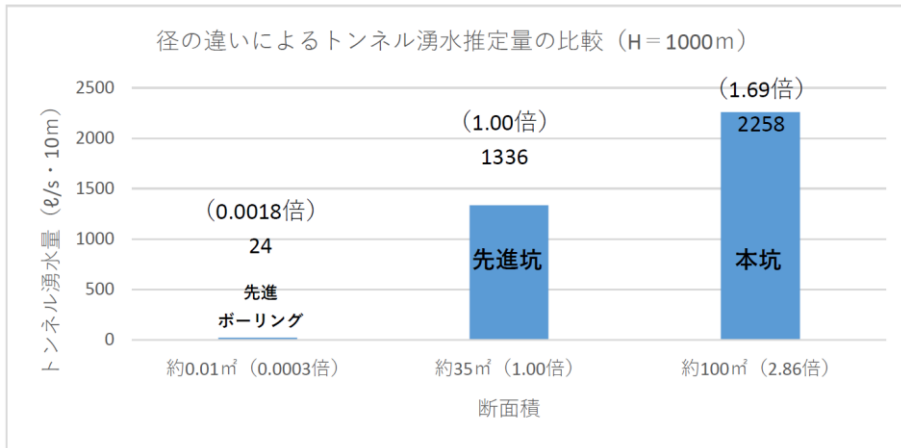
$$Q = 4kr_0H_0$$

- Q = 湧水量
- 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

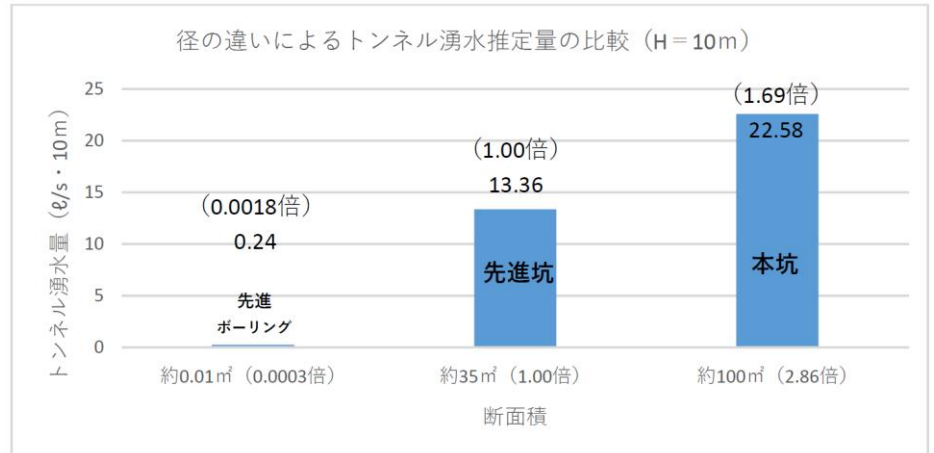


（出典）
「トンネル施工に伴う湧水湧水対策に関する調査研究（その2）報告書」（社団法人トンネル技術協会）
P.153 表2.4.8 集中湧水の予測式一覧表

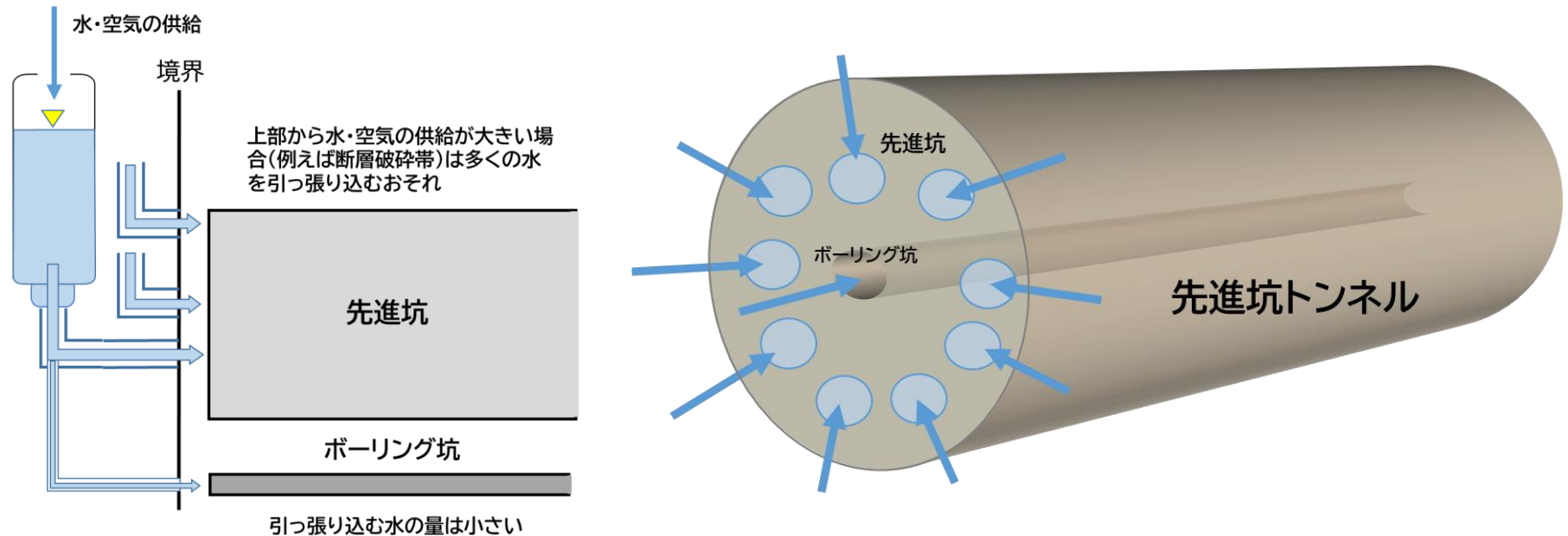
◎水頭差（H）が1000mの場合



◎水頭差（H）が10mの場合



難波が推奨する計算方法の直感的理解



計算結果の意味：

水圧は、切り羽の断面に対し、一様にかつ直交してかかる。串が刺さる量(流入量＝湧水量)は断面積に比例する。よって、断面積が小さいボーリング坑からの流入量(湧水量)は小さい。

⇒ 示唆されること

ボーリング坑の先端には、高水圧がかかるので、慎重に掘り進めること。水圧は高いが、流入量は小さい。(突発湧水が出た瞬間に坑道を絞れば、危険は回避できる。)

しかし、安易に掘り進むと、ボーリング坑の延長の側面から大量に湧水が生じるので、気をつける必要がある。

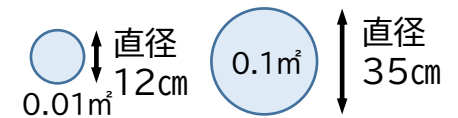
「先進坑の切り羽」と「ボーリング坑の切り羽」では、湧水量が全く異なるので、対処方法も異なる。

高い水圧と土圧がかかっている場所のトンネル切り羽付近の湧水状態の総括

状態1:先進坑の切り羽が境界面に近づいた時

- ◎ トンネル周辺の水圧は高い。トンネル内は大気圧で、周辺より圧力が小さい。
- ① 境界の左右側のどちらの水も、高い水圧の水が、大気圧の先進坑内に湧き出てくる。湧き出た水(湧水)は、トンネルの傾斜に沿って流下し、富士川へ流れる。
- ② 岩体の中にある水は、隙間に入っている水なので、量が少なく移動しにくい。トンネル近傍の水はすぐにトンネル内に流れ出るが、遠くの水はトンネルへ到達するまで時間がかかる。
- ③ 岩体内の水が切り羽からトンネル内に流出した場合、岩体内の水圧が下がるため、岩体内の水は流出しにくくなる。湧水量は掘削直後は大きいですが、その後はだんだん小さくなる。しかし、先進坑は断面積が大きい分、その量は無視できない可能性がある。

状態2:ボーリング坑が境界面まで到達した時(ボ1)



- ① 高速長尺先進ボーリングのボーリング坑は直径12~35cm、断面積0.01~0.1m²であり、ボーリング坑先端(切り羽)からの流入量は、比較的少ない。
- ② 掘削直後に一時的に境界左側の水を引っ張り込んだとしても、大量の水を持つ断層破碎帯の水に繋がっていなければ、切り羽からの湧水量は限定的。(トンネル湧水の形:現象③-① P.6参照)

状態3:ボーリング坑が断層破碎帯に到達した時(ボ2)

- ① ボーリング坑が小さい断面積とはいえ、断層破碎帯の水は圧力が高く、動きやすいため遠くの水も引っ張ってきやすい。(トンネル湧水の形:現象③-② P.6参照)
ただし、断面積が小さいため、湧水量は先進坑に比べて小さく、かつ細かいボーリング坑の中を水が流れる時は管の側面抵抗があるため、流入量は一定の制約を受ける。

トンネル切り羽で境界面左側の水を引っ張る可能性があることについて

- ① 境界面までボーリング坑を掘ると、引っ張る量の大小はともかく、何らかの量で、境界の向こう側（P.3の図の境界より左側部分）の水を引っ張るといった現象が発生する。
- ② ボーリング坑は、断面積が小さいので、引っ張る量は小さい（断層破碎帯がない限り問題になるほどの量ではない）。
- ③ 岩の隙間に水が入っているような地質のところでは、先進坑であっても、切り羽から水を引っ張る量は小さい。どのくらいの量を引っ張るかの仮定の計算は可能なので、現場のボーリング調査結果から、流量を推定して、慎重に対応すれば対処は可能と考えられる。
- ④ 断層破碎帯をボーリング坑が長い距離つら抜くと、たとえボーリング坑の断面積が小さくても、ボーリング坑側壁から大量湧水の可能性があるので、慎重な対応が必要である。

⇒（なんばの私見）

「10m単位の平均湧水量でボーリング坑の掘進管理をする」のではなく、「ボーリング坑切り羽のリアルタイム湧水量の計測とそれに基づく掘進速度の管理」が重要。