

# SWING 法による山岳トンネル湧水量の推定 (18 安房農用道 3 号トンネル工事)

## Estimation of Water Volume in Mountain Tunnel by using SWING Analysis Method under Construction

明石 健\*

Takeshi Akashi

小吹 章\*\*\*

Akira Kobuki

木村 哲\*\*

Tetsu Kimura

### 要 約

表題の SWING 法とは、山岳トンネル掘削による湧水量変化や周辺の地下水位低下等を、精度を有しつつ簡易かつ迅速に予測する地下水解析法である。本論文ではこの解析システムを実際のトンネル工事に適用したときの事例を紹介し、全体湧水量推定実績から本手法の現場適用性について検討する。

本手法を適用した 18 安房農用道 3 号トンネルは房総半島南端の丘陵に構築される延長  $L=1138$  m の道路トンネルである。当初、地形・地質の特徴よりトンネル湧水量は少ないと予想されていたが、TD340 m 付近より予期しない集中湧水が生じ、トンネル掘削延長の 1/3 の時点で坑口湧水量が 600 l/min に達した。このため施工途中で濁水処理設備の能力増強が迫られ、それに先立ち今後の湧水量予測を行った。経験的手法での予測は 1200 l/min となった。一方、SWING 法の予測では 900~1300 l/min の範囲で変動するという結果となった。実際の湧水量は 900~1200 l/min の範囲であったため、SWING 法による予測は実際と概ね一致したとみなせる。

SWING 法は、坑内湧水量、地山地下水位、地表水を連携させて解析することから、今回主題とした坑内湧水量のみならず地表の湧水予測にも活用できるという利点がある。解析は一般の表計算ソフト (EXCEL) で行うことができるため、例えば三次元浸透流解析などより迅速かつ低コストで実施できるという利点もある。SWING 法はトンネル坑内湧水および周辺の地表水・地下水の変化を十分評価しうる解析法であると評価できる。

### 目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 適用対象トンネル概要
- § 3. 坑内湧水状況
- § 4. 経験的手法による湧水量予測
- § 5. SWING 法による湧水量予測
- § 6. 湧水量予測結果の評価
- § 7. おわりに

### § 1. はじめに

山岳トンネルの湧水に関しては、集中湧水による工事への影響や湧水などによる地表環境への影響などがしばしば問題となる。ところが山岳トンネルの地質は一般に

不均質でその分布も不規則であり、水理特性を完全に把握することは困難であることから、湧水の予測は難しいとされている。一般には、社会的要求から費用と手間をかけた解析やモニタリングが要求されない限り、経験的手法などによって湧水量等が想定されているにすぎない。

このような中で近年、SWING 法 (System for Water Information of Ground)<sup>1)2)3)</sup> という解析法が注目されている。この方法はトンネル地山全体の水循環系を考慮した新しい地下水情報化施工方法であり、坑内湧水量、地下水位、地表水などを水理式で連立し、地表および地下の全体系からトンネル湧水とその影響を評価するものである。

筆者らはこの SWING 法を 18 安房 農用道 3 号トンネル建設工事に適用し、その効果を検証した。本論文では経験的予測方法と比較し SWING 法の有用性について議論する。

\* 土木設計部 設計課

\*\* 技術研究所 技術研究部

\*\*\* 東関東 (支) 安房白浜トンネル (出)

§ 2. 適用対象トンネル概要

2-1 工事概要

工 事 名：18 安房 農用道 3 号トンネル工事  
 発 注 者：独立行政法人 森林総合研究所 森林農地整備  
 センター 安房南部建設事業所  
 施 工 者：西松建設株式会社 (単独)  
 工事場所：千葉県南房総市白浜町地内  
 工 期：平成 18 年 12 月 28 日～平成 21 年 3 月 13 日  
 諸 元：トンネル延長 L=1137.83 m  
 内空断面積 A=46.5 m<sup>2</sup> (覆工後)  
 道路幅 B=7.5 m  
 支保方式 NATM  
 掘削工法 ショートベンチカット工法  
 掘削方式 機械掘削  
 運搬方式 タイヤ方式

2-2 地質概要

本トンネルは房総丘陵南部の館山丘陵に位置する。トンネル部の丘陵標高は概ね 70~120 m 程度で、土かぶりには 50~70 m 程度である。地質は新第三紀鮮新世~第四紀更新世の千倉層群と呼ばれる砂岩、泥岩、およびそれらの互層である。これらの地層はおおむね東西走向で 35°~40° 程度で北へ傾斜している。事前調査で求められた砂岩の一軸圧縮強度は 2.6~2.7 MPa であり、トンネル一般部の設計地山等級は DI~DII である。

§ 3. 坑内湧水状況

本トンネルの事前調査結果では、トンネル湧水は格段注意をはらうべきものとはされていなかった。工事の計画段階で濁水処理設備の設備規模は 30 m<sup>3</sup>/hr (500 l/min) と規定され、工事用水量を考慮したとしてもトンネルの全体湧水量はこの設備規模の範囲で十分納まるものと考えられていた。

ところが TD340m 付近の切羽から湧水が増加し始め、トンネル坑内より排出される濁水量が急激に増加した。初期の段階では湧水の清濁分離を行い、当初計画の濁水処理設備で施工できるような工夫を行ったが、未掘削区間がまだ 800 m 近くあることから今後これを維持し続けることは不可能であると判断した。そこで設備増強に際し今後のトンネル湧水量予測を行う必要が生じた。

トンネル TD381m での湧水量は切羽左肩部で 60 l/min 切羽右肩部で 240 l/min であり、この時点での坑内全体湧水量は 600 l/min であった。これらより TD381m 付近の切羽集中湧水量は 60+240=300 l/min、それ以前の既掘削部での湧水量は 600-300=300 l/min と区分できる。なお湧水状況を切羽で確認したところ、地山の縦亀裂面から湧出していることが多い、という観察結果であった。

§ 4. 経験的手法による湧水量予測

4-1 地質別比湧水量 (経験値) による湧水予測

既存の文献<sup>4)</sup> から引用した地質別のトンネル比湧水量 (経験値) を表一に示す。

表一 地質別にみたトンネル比湧水量<sup>4)</sup>

地質分類	比湧水量の範囲		平均比湧水量
	m <sup>3</sup> /min/km	m <sup>3</sup> /min/km	
火山岩	0.85~10		3.71
火山砕屑岩	0.035~0.9		0.30
深成岩類	0.17~3.8		1.38
含片麻岩	0.018~0.84		0.20
古生層	0.10~4.5		0.79
中世層	0.0~0.95		0.17
第三紀 洪積世	砂礫層	0.02~3.6	0.84
	砂岩・頁岩 ・凝灰岩	0.014~0.95	0.25
	泥岩	0.0~0.26	0.07

の欄は同質岩のうち破砕帯の多いもの  
 (※ m<sup>3</sup>/min/km の単位と l/min/m の単位は等価である)

本トンネル地山の地質分類は表一の第三紀~洪積世の砂岩・頁岩・凝灰岩に当てはまるものと判断できる。したがって以下の比湧水量が抽出できる。

比湧水量の範囲：0.014 l/min/m~0.95 l/min/m  
 平均比湧水量：0.25 l/min/m

ここで平均比湧水量の値を採用してトンネル全体の湧水量を計算すると以下ようになる。

$$Q = 0.25 \text{ l/min/m} \times 1138 \text{ m} = 285 \text{ l/min} (\approx 300 \text{ l/min})$$

集中湧水時の湧水量は既にこの値を上回っていることから、本結果は予測値として不適である。

4-2 既掘削区間の湧水実績に基づく湧水量予測

次に、既掘削区間の実績はトンネル全体湧水量を反映するという仮説に基づき、単純な比例計算からトンネル全体の湧水量を想定する。地下水に影響する地形・地質条件は全線通して概ね同様とみなせると仮定すると、TD381m までの比湧水量は単純には以下ようになる。

$$q' = 300 \text{ l/min} \div 381 \text{ m} = 0.79 \text{ l/min/m}$$

トンネル全線の湧水量は、比湧水量にトンネル延長を掛けた [通常区間流量] と TD381m 付近に代表される [集中湧水流量] の合算であると仮定すると、トンネル全線の湧水量は以下のように想定される。

$$Q = 0.79 \text{ l/min/m} \times 1138 \text{ m} + 300 \text{ l/min}$$

$$= 1199 \text{ l/min}$$

$$(\approx 1200 \text{ l/min})$$

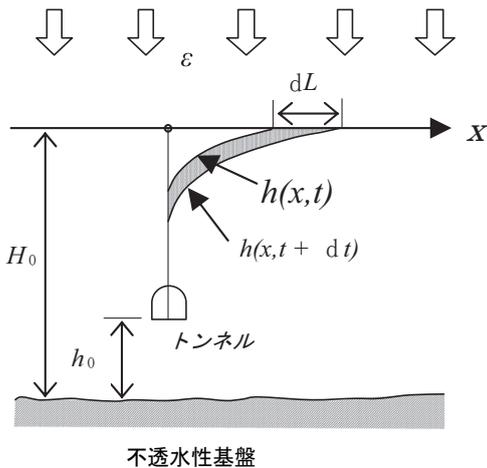
§ 5. SWING 法による湧水量予測

5-1 SWING 法の概要

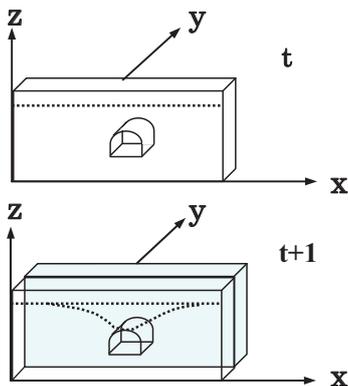
SWING 法は、浸透流解析やタンクモデル等に代表される地盤モデルを用いた数値解析法ではなく、実際のトンネル掘削により発生した湧水量を基に単位スライスボリュームの水力定数(透水係数や有効間隙率)を求め、これにより地下水に関わる諸情報(地下水位低下量や低下範囲、地表水減少量)を求め、かつ将来予測計算を行うという山岳トンネル地下水解析方法である。

本ケースの場合、まず既存情報から縦断方向における水理地質区分を設定し、その初期設定にて SWING 法を適用させる。その後、進捗に合わせて既施工区間流量の見直しと未施工区間の予測計算を繰り返し行った。なお今回の解析は坑内湧水増加後より行われ、掘削実績に基づき更新作業がなされた。更新作業時間は 2~3 時間程度であった。

次節では SWING 法の基礎理論として各水収支要素の算定式について説明する。



図一1 単位スライスボリュームにおけるトンネル湧水量の算定方法



図二2 トンネル進捗に伴う単位スライスボリュームの累積

5-2 SWING 法の基礎理論

(1) トンネル湧水量と地下水位低下量の算定

掘削に伴うトンネル湧水の基本的な性質や地下水流動メカニズムを捉えるために 1 次元非定常流を考える。水平不透水性基盤上の帯水層中に地盤サイズに比べて十分小さい径のトンネルを設けたものと仮定する。初期水位  $H_0$  は掘削後の経過時間とともにトンネル直上から徐々に低下する。図一1 に示すとおり、降雨浸透量  $\epsilon$  を伴う帯水層は、初期  $t=0$  で地下水位は水平であると仮定すると、 $t$  における地下水水面は Dupuit の準一様流<sup>5)</sup> に基づく式(1)から求められる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{(h^2 - h_0^2)}{(H_0^2 - h_0^2)} &= \frac{x}{L} \\ q &= k \frac{(H_0^2 - h_0^2)}{2L} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ここに、

$k$  : 地盤の透水係数

$h$  : 地下水位

$h_0$  : 不透水性基盤からトンネル底盤までの距離

$H_0$  : 初期地下水位

$q$  : 単位スライスボリュームのトンネル湧水量

$L$  : 単位スライスボリューム内で発生する地下水位低下区間

また、 $t=t+dt$  後には図一1 に示す水位低下域の水量はトンネル湧水量  $q$  に等しいことから、 $dt$  間の地下水位低下区間の増加を  $dL$  とすると式(2)が成立する。

$$qdt = k \frac{(H_0^2 - h_0^2)}{2L} dt = \lambda e \frac{(H_0 - h_0)}{3} dL + \epsilon L dt \quad (2)$$

ここに、 $\lambda e$  : 有効間隙率、 $\epsilon$  : 降雨浸透率

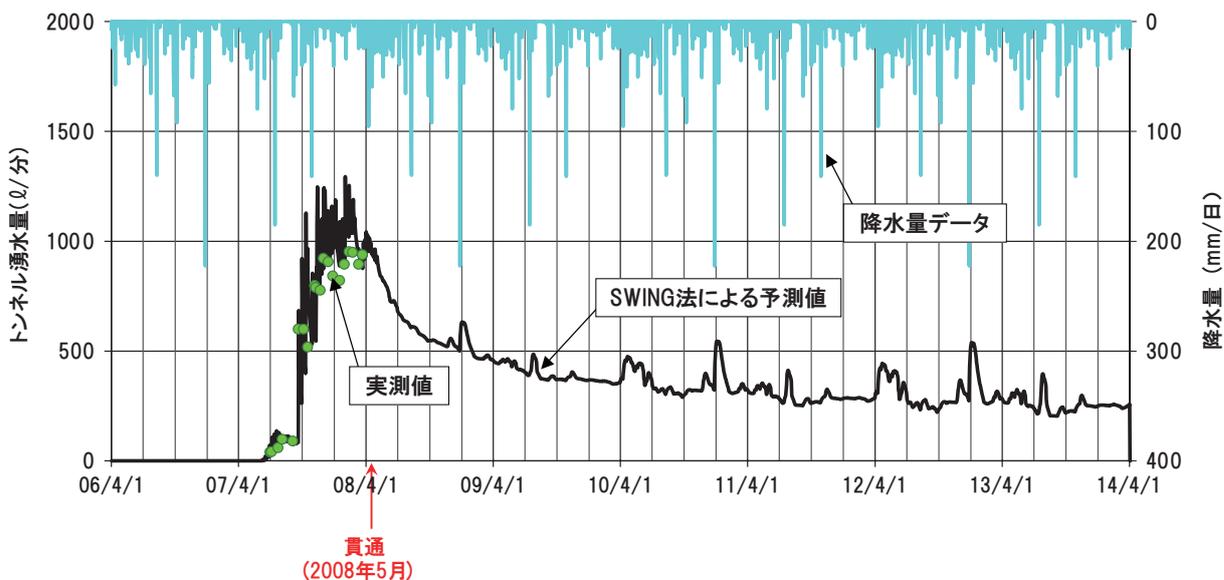
さらに  $t$  で積分すると下式(3)となる。

$$q(t) = \frac{k(H_0^2 - h_0^2)}{2L(t)} = \frac{k(H_0^2 - h_0^2)}{2 \left[ \frac{k(H_0^2 - h_0^2)}{2\epsilon} \{1 - e^{-6\epsilon t / \lambda e (H_0 - h_0)}\} \right]^{1/2}} \quad (3)$$

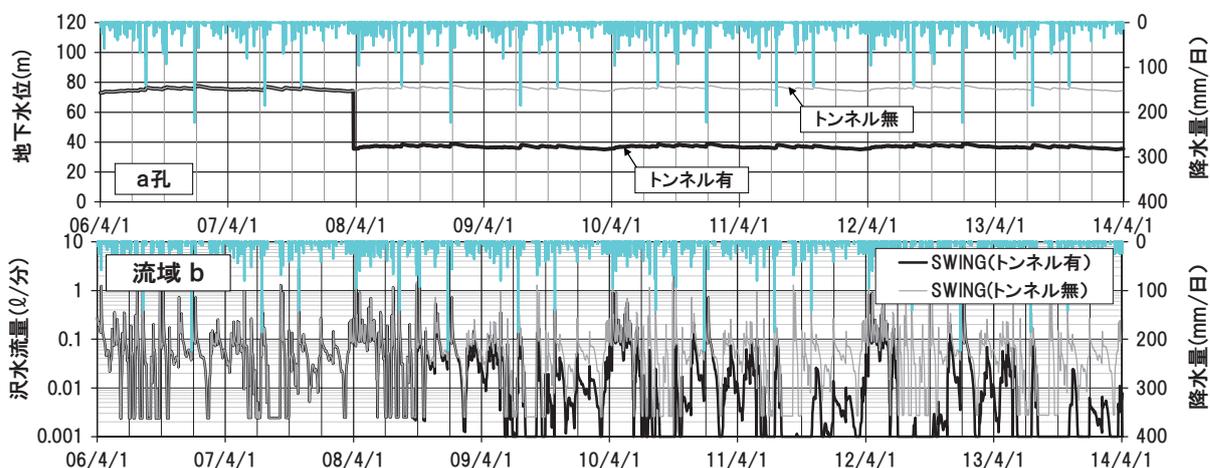
したがって、各スライスボリューム内におけるトンネル湧水の低減量が計算できることになる。すなわち SWING 法は、図二2 に示すとおり、トンネルの進行に合わせて掘削スライス毎に掘削距離を経時変化パラメータとして順次算出するものである。各スライスボリュームの累積量はトンネル坑口湧水量となる。ここで、水循環要素として降雨浸透率  $\epsilon$  を考慮する必要があるが、これについては地表部における限界貯留高、及びホートン流出(降雨の余剰分は地表流となるという概念)を再現した 1 次元タンクモデルを適用し、降雨量に応じた降雨浸透率を採用する。

トンネル湧水に伴って地下水位低下量や低下範囲は拡大するが、これらは各スライス毎に式(3)に示した水理式から求めることができる。





図一六 トンネル貫通後の坑口湧水量の経時変化



図一七 トンネル掘削に伴う地下水位経時変化と沢水流量経時変化  
 (上段：トンネル上の仮想観測孔 (a 孔) における地下水位)  
 (下段：トンネル上の仮想堰 (流域 b) における沢水流量)  
 ※紙面の都合で位置情報の表示は省略した。

次に SWING 法による坑口湧水量の長期にわたる経時変化の予測結果について記述する。図一六に示すように、トンネル貫通後の坑口湧水量は徐々に減衰傾向を示し、約 1.5 年で 400 l/min 程度まで減少する。その後、降雨量の多寡により、降雨直後に最大 500 l/min 強まで増加するが、ほぼ 250~300 l/min 程度で恒常湧水量を示すものと予測される。なお降雨条件については、将来の降雨を予測することはできないため、ここでは便宜上、施工期間中の降雨を繰り返して用いている。

地下水が急減するが (図中では 08/4/1 頃)、その後はほぼ一定の値で推移する予想となっている。一方、図一七 (下段) はトンネルルート上の仮想流量堰の沢水流量の変動予想を示す。降雨応答が顕著で降雨時には急激に流量が増加するが、長期で見るとトンネルの影響が少しずつ増していくように見える。

実際に湧水が問題になる場合は、地表に観測孔や流量堰などが多数設置され原位置測定が行われると思われるが、SWING 法はこれらの評価と将来予測が可能である。

5-4 SWING 法による地下水位と表流水の予測

SWING 法はトンネル湧水量予測だけでなく地下水位や沢水流量の変化も同時に予測できる方法である。

図一七 (上段) はトンネルルートに沿う仮想観測孔の地下水位の変化を表している。トンネルの接近に伴い地

§ 6. 湧水量予測結果の評価

6-1 湧水量予測結果の比較と評価

表一2に、今回行ったトンネル全体湧水量の予測結果と実測流量についてまとめ、それぞれを比較する。

表一 湧水量予測値と実測値との比較

□ 経験的方法による予測値	
・ 地質別比湧水量 <sup>4)</sup> (平均値) による予測	300 ℓ/min
・ 既掘削区間の湧水実績に基づく予測	1200 ℓ/min
□ SWING 法による予測値	900 ℓ/min~1300 ℓ/min
■ 実測値	900 ℓ/min~1200 ℓ/min

経験的方法のうち地質別比湧水量 (平均値) に基づく予測値は実際流量の 1/3~1/4 となった。参考までに、比湧水量の最大値を用いて湧水量を想定しても 1081 ℓ/min になり、実測値上限に届かない。このように、一般に使用されている地質別比湧水量<sup>4)</sup> については、本トンネルでの対応状況は良好ではないといえる。

一方、既掘削区間の湧水実績に基づく予測値は実測値の上限値と同じであり、結果的にみて外れた値ではない。限られた時間での極めて簡単な計算ではあったが、それでもこのレベルの結果が得られたということは、現場のリアルタイムで正確な生データがいかにも有用なものであるを示している。

さて、最後に SWING 法による予測についてであるが、解析による予測値は実測値と概ね合致しているといえる。トンネル湧水量は施工状況、地質状況、気象状況などによって日々変動するが、本トンネルでの予測については、単純に結果だけを見ると、この変動幅にまで概ね対応できていると判断される。

## 6-2 SWING 法の特徴と課題

SWING 法は坑内湧水量、地山地下水位、地表水などの複雑な要素を、簡易的ながら適切に調和させた解析法である。改めてその特徴を列挙すると以下ようになる。

- ・ トンネル周辺の水環境全体を評価するので、工事に際してしばしば問題となる坑内湧水問題と地表湧水問題の両方についての対応が可能である。
- ・ 時間の経過を取り扱うため将来予測が可能である。
- ・ 施工情報をフィードバックすることにより予測精度が向上する。
- ・ 解析作業は一般の表計算ソフト (EXCEL) で行うことができる。進捗に伴う更新作業時間はおおよそ 2~3 時間である。たとえば三次元浸透流解析などと比べ相対的に安価かつ迅速に対応できる。

本トンネルの事例では良好な予測ができたという評価結果となったが、山岳トンネルの地形・地質条件にはさ

まざまなバリエーションがある。これらの条件が変わったときの精度がどの程度のものになるかは、今後とも事例を通じて検証していく必要がある。

また、本手法に限った問題ではないが、解析に際して地下水にかかわる諸入力値をどのように設定するかという問題は相変わらず大きな問題である。本手法は掘削実績から単位スライスボリュームの透水係数や有効間隙率を逆算していくので、掘削が進むほど精度が向上するという特性があるが、未掘削区間の水理定数については既存の情報から推定せざるを得ない。したがってトンネルの計画段階において、入力値として活用できる地質情報の質と量が不十分である場合は、今回ほどの高精度な予測精度は期待できない可能性がある。これについても今後の課題である。

## §7. おわりに

山岳トンネル工事においては事前に地山の透水性を見極めることは困難なことから、地下水に関わるトラブルを余儀なくされる事例が多い。SWING 法はこうした問題に対して迅速な対応が可能なシステムであり、今後のトンネル施工で重要な役割を担っていく可能性がある。

最後になるが、本論文を執筆するに当たり水文技術コンサルタント(株)高橋健二博士には多大なご協力をいただいた。京都大学大西有三教授には貴重なサジェスションをいただいた。また東関東支店安房白浜トンネル出張所の皆様には正確なデータの提供に尽力していただいた。お忙しい中、本論文の執筆にご協力いただいた以上の皆様に、改めて感謝の気持ちを申し述べる次第である。

## 参考文献

- 1) 高橋健二, 大西有三, 安田 亨, 熊 俊: 山岳トンネルの地下水情報化施工簡易システム (SWING) の構築, 土木学会 地下空間シンポジウム論文・報告集, vol. 13, pp. 147-150, 2008.
- 2) 安田 亨, 高橋健二, 大津宏康, 大西有三: 山岳トンネルにおける地下水情報化施工法の提案, 土木学会第 59 回年次学術講演会, VI-394, pp. 785-786, 2004.
- 3) 松井 保, 磯崎弘治, 早坂 毅, 安田 亨: 箕面トンネルにおける地下水情報化施工法 (SWING 法) の開発, 土木学会第 58 回年次学術講演会, III-016, pp. 31-32, 2003.
- 4) 日本トンネル技術協会: トンネル施工に伴う湧水枯渇に関する調査研究 (その 2) 報告書, 190 p, 1983.
- 5) 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, vol. 23, No. 3, pp. 50-56, 1982.