

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

SIMPLIFIED SEEPAGE ANALYSIS SYSTEM(SWING) APPLIED TO TUNNEL EXCAVATION FOR ASSESSMENT OF WATER INFLOW

高橋健二¹・大西 有三²・安田 亨³・熊 俊⁴

Kenji TAKAHASHI・Yuzo OHNISHI・Toru YASUDA・Xiong JUN

In construction of mountain tunnels we prepare to prevent or to control tunnel collapse and tunnel drainage when the large amount of water flows in due to the complex geological nature of the ground. Groundwater problems include the series of damage to the surrounding water environment that come from groundwater drawdown and the impacts to existing water resources. Misunderstanding of groundwater behavior inevitably leads to enormous cost overruns and extension of construction work. Numerical analysis requires the time and effort for preparing ground models of a different scales and processing the data. For this reason, in almost cases, the evaluation of groundwater problems has relied only on preliminary works and verification analysis rarely been. Moreover, even with current analysis tools it is difficult to conduct impact evaluations that reflect the preceding excavation data. This paper proposes a new observational system in relation to groundwater for mountain tunnel construction. The system is called as Simplified Seepage Analysis System ("SWING"), which is easy to use because of simple concept and quick calculation by spreadsheets (like EXCEL).

Key Words : Tunnel excavation, Water inflow, SWING method, Semi-analytical method

1. SWING 法の開発

トンネル工事に関する地下水問題は、施工面では大量湧水に伴う切羽崩落防止やトンネル排水の処理、及び安全施工するための地下水対策工の必要性が課題である。また、周辺環境面では地下水排水に伴う周辺水環境への損傷、既設水源に及ぼす地下水低下影響が挙げられ、これらの自然環境保全はトンネル工事に関わる重要課題である。

こうした地下水に係わる課題を評価する方法として地下水解析法が採用されるが、既往の地下水解析は、ある規模の地盤モデルの作成が必要となること、また、演算性能が向上したとしても解析時間やデータ処理などの労力が必要となる。すなわち、地下水解析の実施に当たっては、トンネル工事の実績データによる逆解析や工事中を含めて、地下水挙動を評価するための検証解析は、変形解析等に比べて実施されたケースは少なく、殆ど事前評価に始終している。増してやトンネル掘削進行に応じて、施工中の実績データを反映した影響評価を行うことは現状の解析ツールを用いても困難である。ここではこうした背景を鑑み、トンネル周辺の水環境保全やトンネル工事の地下水問題について、予測精度を有し、簡易的、かつ迅速な対応が可能となる評価法 (SWING 法と呼ぶ) を提案する。

本研究では、水循環系を考慮しつつ、経済的、合理的な施工を目的として開発した SWING 法の内容、それに関する解析法の開発、並びに評価手法について記述する。本研究における SWING 法の開発の背景として、実際の長大トンネルの施工に際し、掘削時の集中湧水等の湧水対策、及び周辺水環境問題に対して、次の基本方針を満足できる

キーワード：トンネル掘削、トンネル湧水、スイング法、簡易解析システム

¹ 正会員 水文技術コンサルタント株式会社 水文技術部 主任研究員

² 正会員 京都大学大学院教授 工学研究科都市環境工学専攻

³ 正会員 パシフィックコンサルタンツ株式会社 大阪本社交通技術部 部長

⁴ 非会員 京都大学大学院工学研究科 都市環境工学専攻 大西研究室博士課程

地下水解析が必要とされていた。

- ・従来の水文学的方法では、施工後の恒常湧水量や湧水影響範囲の予測は可能であるが、工事中の施工実績による修正が困難であり、湧水対策水量等の水量的な評価ができない。これを補う予測評価法であること、且つ工事実績が迅速にフィードバックできる解析法であること。
- ・水循環系の要素であるトンネル湧水や表流水などの水量的な評価が可能なシステムであること。従来の地下水解析は工事実績や水量的な評価が精度を持って可能であるが、地盤モデルが複雑になることやパラメータ自体が煩雑となり、随時工事に適合させて予測評価を行うためにはある程度の解析期間が必要になる。これを補って迅速、且つ数量的な評価が可能な解析方法であること。
- ・可能な限り工事実績を基にした精度のあるトンネル湧水予測、及び湧水予測評価する必要性が高く、この評価結果を基に工事中においても周辺水環境への具体的な保全対応を行うことが可能な解析方法であること。

2. SWING 法による水収支解析モデル

SWING 法は、浸透流解析や修正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、トンネル進行距離 50m を単位スライスボリュームとしてモデル化し、このスライスボリューム内において、水理式を適用して透水係数や有効間隙率を求める。さらに実績から得られた水理定数を基に、スライスボリュームにおける地下水位低下範囲や低下量、及び沢水減少量を求める方法である。

本研究の場合、着工前の入力値はトンネル縦断における弾性波速度、比抵抗値等の物理探査結果からトンネル縦断方向における水理地質区分を設定し、その初期設定を基に SWING 法を適用して予測し、トンネルの進捗に合わせて施工実績から既施工区間の見直し、及び未施工区間の予測を繰り返し行った。この解析事例では入力データの修正を含めてトンネル湧水、地下水位低下範囲、沢水減少量について数時間程度で既施工区間の同定と未施工区間の予測評価を行っている。また、実際の適用に当たり、切羽位置で行われた水抜ボーリングの実績を迅速に取り込み、本坑掘削時の湧水やそれに伴う湧水影響予測を即座に行ったケースもある。以下に SWING 法における各水収支要素の算定式を示す。

(1) トンネル湧水量と地下水位低下量の算定

一般的に、トンネル掘削に伴う湧水の基本的な性質や発生する規模を予測する場合は、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。すなわち、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 が一定とする地下水位は、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。SWING 法では、このプロセスを Dupuit の準一様流解析¹⁾に置き換える。図-1 に示すとおり、降雨浸透量 ε を伴う帯水層は初期 $t=0$ では地下水位は水平であると仮定すると、 $t=0$ における地下水面は Dupuit の準一様流の式(1a)から求められる。

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

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である。

また、 $t=t+dt$ 後には、図-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(2a)が成立する。

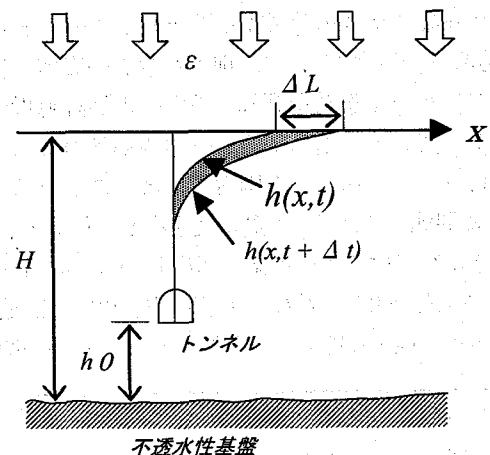


図-1 単位スライスボリュームにおけるトンネル湧水量の算定方法

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

ここに、 λe :有効空隙率、 ε :降雨浸透率、さらに t で積分すると下式(3a)に示すとおりとなる。

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

したがって、これらの水理式の適用により、各スライスボリューム内におけるトンネル湧水量の低減特性が計算できることになる。さらに、SWING 法では、図-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し、既掘削区間における各スライスボリュームの積算水量は、トンネル坑口湧水量に相当する。ここで重要な水循環要素である降雨浸透率 ε を考慮する。この降雨浸透率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。

一方、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、各スライス毎に式(3a)に示した水理式から求めることができる。すなわち、トンネル湧水量は周辺地山の地下水や地質と密接な関係を持つわけであり、トンネル湧水の経時変動や降雨応答は極めて重要な地山情報の 1 つである。SWING 法は、この実績トンネル湧水量を最重要データとして評価している解析法である。

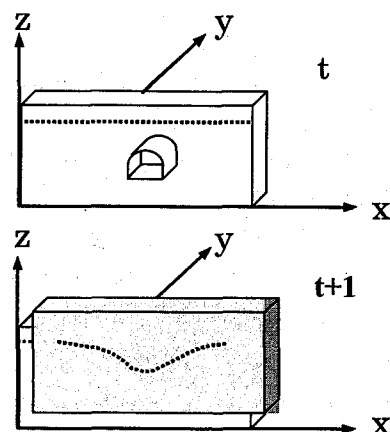


図-2 トンネル進捗に伴う単位スライスボリュームの累積

(2) 表流水への影響評価

ここでは SWING 法における表流水への影響量の算定手順を示す。いま、図-3 に示す谷地形における基底流量を考える。通常、基底流量は流域における地下水流出量と同意であるから、表流水の内基底流量は谷地形の形状から、式(4a)に示す不貫通井戸や開渠の水理公式で近似される。

$$Sp(t) = \frac{\pi K(H_A^2 - h^2)}{\ln(R/r)} \cdot \frac{\theta}{360} \cdot \frac{1}{A} \quad (4a)$$

ここに θ : 流域開口角, A : 流域面積, R : 流域幅,
 r : 平均河道幅である。したがって, トンネル掘削の影響による地下水位低下は, 流域内の地下水位低下に置き換えられ, SWING 法では, その低下量を用いて基底流量の減少を算定する。なお, 表流水は降雨に伴う変動が著しく, 基底流量への影響が直接現地調査における表流水の流量と異なるため, 流量観測地点毎に 4 段階貯留型タンクモデル³⁾を結合し, 基底流量の減少に伴うハイドログラフからトンネル掘削に伴う流量変動を求める。

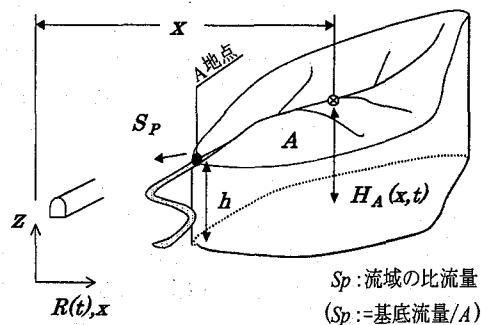


図-3 SWING法における沢水流量の算定法

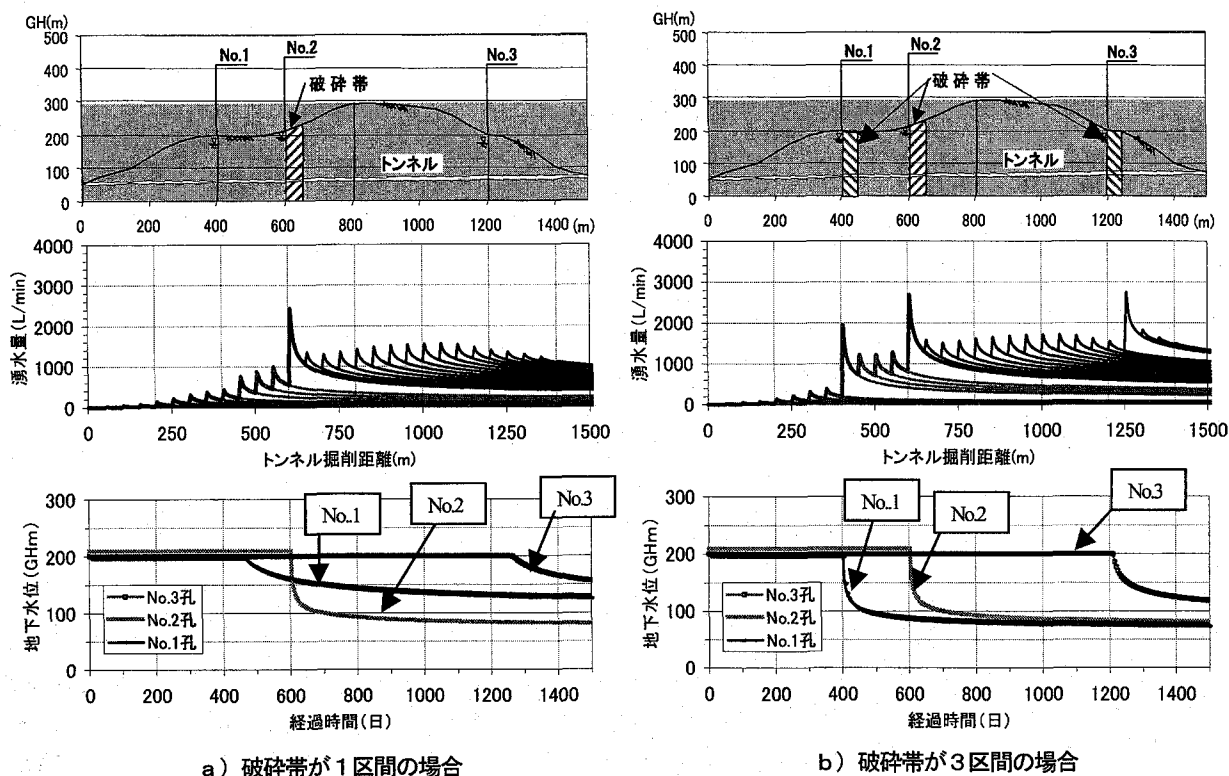


図-4 SWING法におけるトンネル湧水と地下水位の解析事例

3. SWING 法によるトンネル湧水、地下水位の変動解析

図-4 には延長 1.5km の山岳トンネルにおける解析事例を示している。地山の透水性は $k_1=10^{-6}$ cm/sec とし、中間部には破砕帯 ($k_2=5 \times 10^{-4}$ cm/sec) が存在するケースである。トンネルは断面図の左側から月進 60m 進捗する条件とし、最下段図の地下水位は、トンネルルートから離隔 50m 地点における地下水位観測孔の地下水位を示している。左図はルート上に破砕帯が 1 区間、右図は破砕帯が 3 区間存在していた場合である。両図ともトンネル進行に伴う湧水量の増加や破砕帯区間の集中湧水が予想され、かつ切羽の通過の通過に伴う近傍の地下水位低下量が予想されている。SWING 法では、こうした想定が EXCEL を介して数分の処理時間で可能であり、日々現場から報告されるトンネル進捗データを容易に取り込み、既施工区間の検証と未施工区間の予想を繰り返し行うことが可能である。ここでは解析事例として湧水と地下水位を取り上げているが、沢水流量等についても同様の対応が可能である²⁾。

4. まとめ

一般的に、トンネルでは、事前に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が余儀なくされる事例が多い。こうした課題に対して、従来の地下解析は、事前評価として多用され、工事開始以降は予測結果との整合性を議論することはあっても、掘削実績を再評価するまでには至らないケースが多い。

これに対して SWING 法は、利便性を挙げれば、簡便に掘削実績を組み入れることが可能であり、掘削実績を基に周辺の水環境問題や経済的、且つ施工に有益な地下水評価が可能であり、施工面、周辺環境面を考慮したきめ細かい評価が可能な解析法である。

参考文献

- 1) 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，23-No.3，pp.50-56，1982.
- 2) Ohnishi, Y. Tanaka, M. Yasuda, T. Takahashi, K. : *Evaluation of the Effect of Tunnel Excavation for Surrounding Groundwater*, IGCS, pp. 32, 1997.
- 3) Ohnishi, Y. Ohtsu, H. Yasuda, T. Takahashi, K. : *Assessment of Influence in Ground Water Surroundings at Urban Tunnels*, Proc. ITA. World Tunnel Congress '98, pp. 489-494., 1998.