

立坑トンネルの地下水制御のための情報化施工 簡易システム（SWING-SHAFT）の構築

大西 有三^{1*}・高橋 健二²・熊 俊¹・木村 哲³

¹京都大学工学研究科 都市環境工学専攻（〒615-8540 京都市西京区京大桂Cクラスター）

²水文技術コンサルタント（〒261-0004 千葉県千葉市美浜区高洲1丁目24-2）

³西松建設（〒160-0004 東京都港区虎ノ門1-20-10）

*E-mail: ohnishi@geotech.kuciv.kyoto-u.ac.jp

水循環系を考慮した水平方向トンネルの水理情報システム簡易版として地下水情報化施工のためのSWING法（System for Water INformation of Ground）を開発してきたが、これを立坑に適用できるように改良を加えた。この方法は、基本的に井戸理論を基本とした理論解析式を利用しており、EXCELで計算して簡便に掘削実績を組み入れることが可能である。周辺の水環境問題をふまえて経済的かつ効果的な施工に有益な地下水評価を行うことができるので、最新データを予測に用いて施工に反映させ、きめ細かい評価と対策が可能である。骨子は、立坑トンネル掘削時の水循環系を考慮した地下水挙動評価とその検証実績を同時に行うものである。ここでは、システムのコンセプトといくつかの仮想的な例題を示した。

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

1. はじめに

一般的に、トンネルでは工事前に地山の安定性、透水特性を見極めることが困難であることから、地下水に関わるトラブル遭遇を余儀なくされる事例が多い。また、周辺環境面では地下水排水に伴う周辺水環境の損傷（関連で植生や地質環境への影響）、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として最近では大きな社会問題化する場合も見られる¹⁾。このような課題に対して、施工途中におけるトンネルの坑内坑外で発生した地下水や地表水の挙動を観察、計測し、迅速に設計・施工に反映させる方法が重要な役割を担うことになる。

特に、立坑の場合、坑口からのポンプによる汲み上げ以外に排水の手段が無く、また下向き方向に掘削が進むため地下水が集積しやすい。従って、周辺への影響を考えると、水循環や水収支を考慮する必要性は不可避で、最重要課題として取り上げられる。

従来、地下水解析は、膨大なデータからなる地盤モデルを基に数値解析を行うことが多く、工事開始前の事前評価として多用されていた。したがって、工事開始以降は、事前予測結果との整合性を議論することはあっても、解析時間等の関係から掘削実績を再評価するまでには至らないケースが多かった。そこで、水循環系を考慮した地盤の水理情報システム簡易版として地下水情報化施工

を取り扱うSWING法が開発されている²⁾³⁾⁴⁾。

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水循環系を踏まえ、立坑において簡易に地下水挙動を予測可能な評価法（SWING-SHAFT法と呼ぶ）について議論を進める。

2. SWING法

SWING法（System for Water INformation of Ground）は、浸透流解析や修正タンクモデル⁵⁾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（長さは任意）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ものである。さらに実績から得られたこれらの水理定数を基に、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。さらにトンネル工事中において予測結果と現地観測値（沢水流量、地下水位）、及び現況の湧水影響と比較し、誤差を軽減するよう定数を検証するものである。

トンネル施工に関しては、地下水の厳密な3次元浸透挙動よりも、降雨→浸透→地下水流動などの水収支量の変動を計算するタンクモデル⁶⁾や修正タンクモデル⁵⁾法による簡易計算が重宝する。ただし、これらの方法は、

水循環系の要素は考慮しているが、地下水流動メカニズムを考慮できないことは注意が必要である。

SWING 法は、水循環系を考慮した工事の進捗に応じた地下水挙動評価とその検証実績を同時に行うものであり、施工実績に合致した最終的な影響評価を検証できる利点があり、いくつかのトンネルに適用して本解析法が十分実用レベルにあることも確認できている。簡易法である SWING 法の特徴を改めてここに示すと以下のようになる。

- ① 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⁶⁾であるが、工事中の施工実績による修正が困難であり、湧水対策水量等の数量的な評価ができない。一方、SWING 法はこれを補う予測評価法であり、かつ工事実績が迅速にフィードバックできる。
- ② SWING 法は、タンクモデルなどの方法を援用して、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。従来の有限要素法などによる地下水解析は工事実績や定量的な評価がかなりの精度で可能であるが、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とで迅速性が失われていた。SWING 法はこれを補って迅速、かつ数量的な評価が可能な解析方法を実現している。
- ③ 可能な限り工事実績を、迅速に取り込んだトンネル湧水予測及び湧水予測評価することに対する要望は強く、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適宜実施していくことが可能な解析方法であることが要求されており、SWING 法は簡便法であるため計算負荷は小さく、取り扱いも容易なので、それになっっている。

このようなSWING法に対して、トンネルを鉛直に掘削する（立坑）場合、横に掘るトンネルの場合と事情が異なる。しかし、SWING法の特徴と利点は、SWING-SHAFT法にも当てはまると考えられ、その内容を示す。

3. SWING-SHAFT法の基本的な考え方

立坑は鉛直方向に掘削が進むので、モデルとしては円筒形が取り扱いやすい。SWING-SHAFT 法では、解析の対象となる領域を細分して、それぞれの透水特性を割り振り解析を行うが、まず図-1に示すように幾つかのシリンダーボリューム（ n 等分に分割された領域）に分割する（場合によっては、バームクーヘンのように円周方向にも分割は可能であるが、データ数が飛躍的に多くなる）。分割数は、計算精度や対象領域でのデータの量によって随時変更することが出来る。シリンダーボリュー

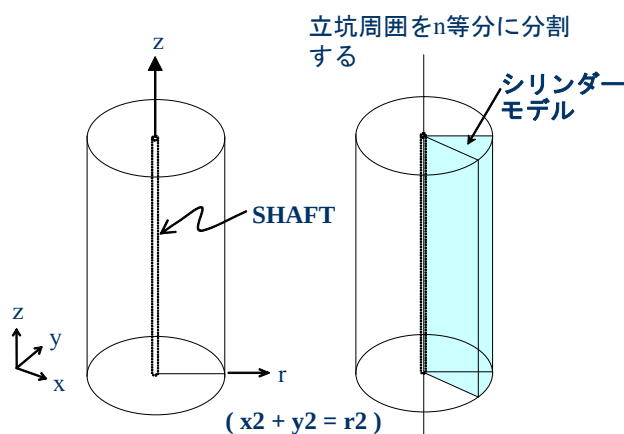


図-1 SWING-SHAFT のシリンダーボリューム

ムの中心に水を汲み上げるための井戸を配置し、非定常井戸理論を適用して、地下水の位置や揚水量を計算する。立坑が複数ある場合は、重ね合わせの原理を用い、時間差を設けて、同じ位置で井戸からの汲み上げが行われているように設定することでモデル化することが出来る。複数の井戸の位置が相当離れている場合は、複数井戸の干渉を考慮した異なる理論式を使わなくてはならないが、通常は単一井戸とし、複数井の取り扱いは今後の課題となっている。

各シリンダーボリューム毎に非定常井戸理論を以下のとおり適用すると、掘削時に発生する $\sum Q$ は、

$$\sum Q = Q_1 + Q_2 + \dots + Q_{n-1} + Q_n \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} Q_n(z, t) &= \frac{4\pi K_n (H_n - h_n)}{\ln \left(\frac{2.25 T_n t}{r^2 S_n} \right)} \\ S_n(r, t) &= \frac{Q_n}{2\pi T_n} \ln \left(\frac{R_n}{r} \right) \\ R_n(r, t) &= \sqrt{\frac{2.25 T_n}{S_n}} \cdot \sqrt{t} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

から求めることができる。各式の n はシリンダーボリュームの番号を示し、 Q_n は湧水量、 S_n は地下水位低下量、 R_n は影響半径、 K_n は透水係数、 H_n は帯水層厚、 T_n は透水量係数である。

理論式から得られた Q を各シリンダーボリュームの総和と仮定する。ただし、ここで各 Q は上式で表される。これらの式を用いて、各シリンダーボリュームごとに Q （湧水量）と r ：地下水位（水頭）を求める。各シリンダーでは、水理特性の違いにより、水位低下が異なる。それを表現したのが図-2の中の点線である。この図で

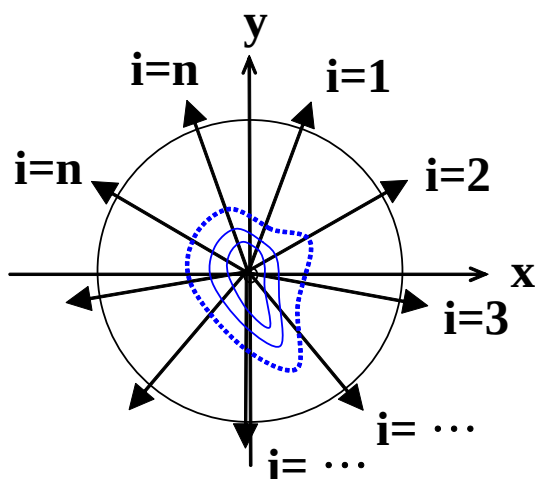


図-2 シリンダーボリュームの設定

は、シリンダーを8つの扇状柱部分に分割している。各々の分割柱の中では、物性に応じた水位低下が起こっており、それを図示したものが、図-3となる。それらをまとめて、円柱の中心を縦に切断した面で地下水位低下を図に示したものが図-4である。

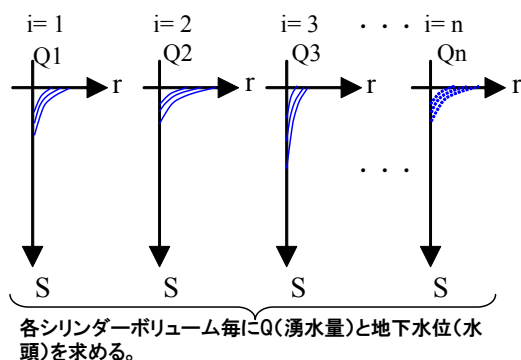


図-3 各シリンダーにおける水位低下

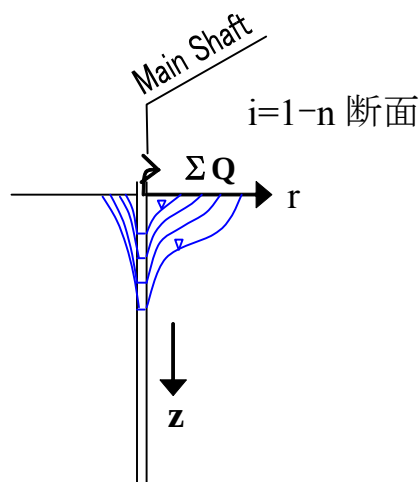


図-4 立坑周囲における地下水位低下

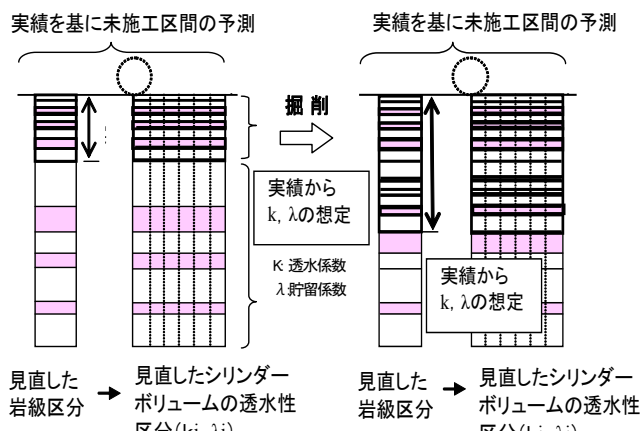


図-5 シリンダーの透水性区分

鉛直方向の物性値の分布をモデル化するには、図-5のように地層形状にしたがって細分化を行う。掘削が進行するとその位置に対応した理論式を適用し、湧水量と水面位置を計算する。掘削は段階的に実行されるので、ステップごとの結果を足し合わせたものが全湧水量として記録される。実際の工事では、ポンプによる汲み上げ量のトータルが全湧水量となる。実際の工事での湧水量と計算値を比較し、誤差があれば、両者が一致するように物性値（透水係数など）を修正し、適切な値を選定する。こうした物性値の同定には、最適化法（人工ニューラルネットワークや遺伝アルゴリズムなど⁷⁾が知られている）が用いられる。

4. SWING-SHAFT法の適用性

現実の掘削工程を考慮して現場を想定した例を図-6に示す。図面中心で斜めに点線で走っている掘削工程線は当初の計画であるが、何らかの理由で工程に変化が生

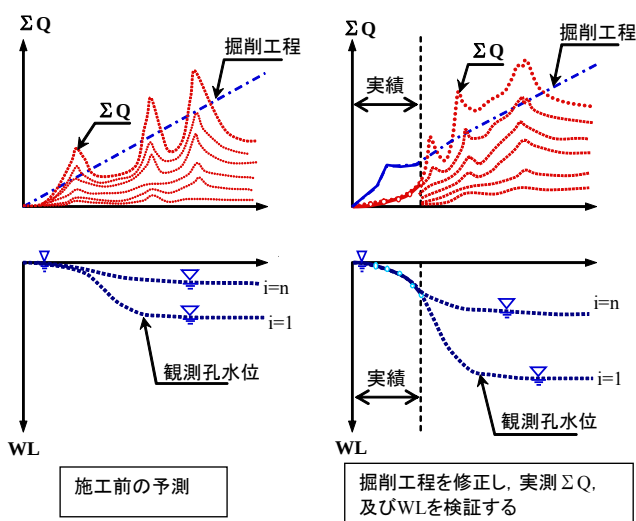


図-6 SWING-SHAFTの適用例
(実績区間の検証と未施工区間の予測)

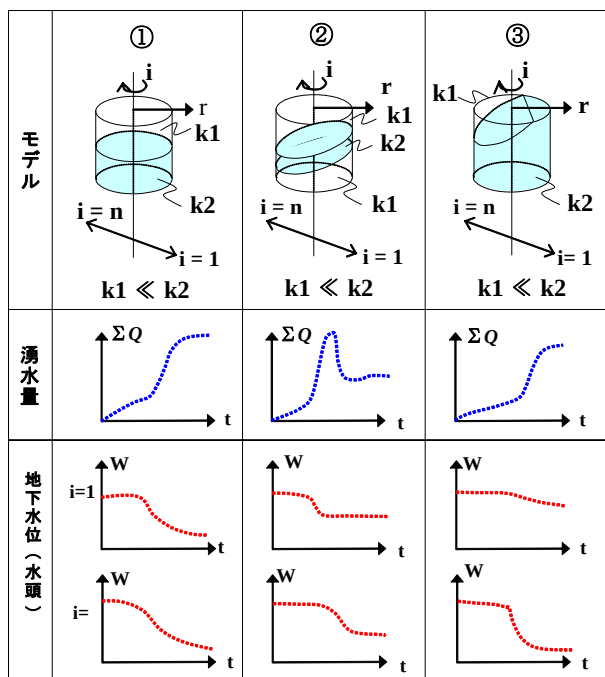


図-7 SWING-SHAFT の解析例
(掘削に伴う湧水量と地下水位変化)

じたとすると掘削工程線に変化が生じる。図-6の右側の図では、その状況を示しており、それに伴って湧水量に変化が生じる。こうした変化に対応して SWING-SHAFT 法では臨機応変に計算内容を変動できるので、実務に適用し易い。

また、地盤定数が不確かであるときには、いくつかの定数で試算を行っておき、実際の湧水量が計測されたときに、「どの線に一致するか」から地盤定数を推定するという逆解析的な使い方も可能である。

立坑周辺のどこかで地下水位を計測しておれば、その値をチェック項目として地盤定数の同定を行うことも試みられている。こうした計算は、有限要素法のような数値計算と異なり簡単な理論界をベースにしているので、極めて短時間に終了する。したがって、湧水量や地下水面の位置が計測されたときに直ちに計算 (Excel で) を実行すれば、何度も繰り返し計算してもさほど時間はかからず、計算負荷も低いので、情報化施工の道具としての価値は高い。

図-7に SWING-SHAFT 法の仮想的な例題を示す。立坑位置に透水性の大きな地層が存在するときの影響を考慮したものである。水平層がある場合、斜めの層が存在

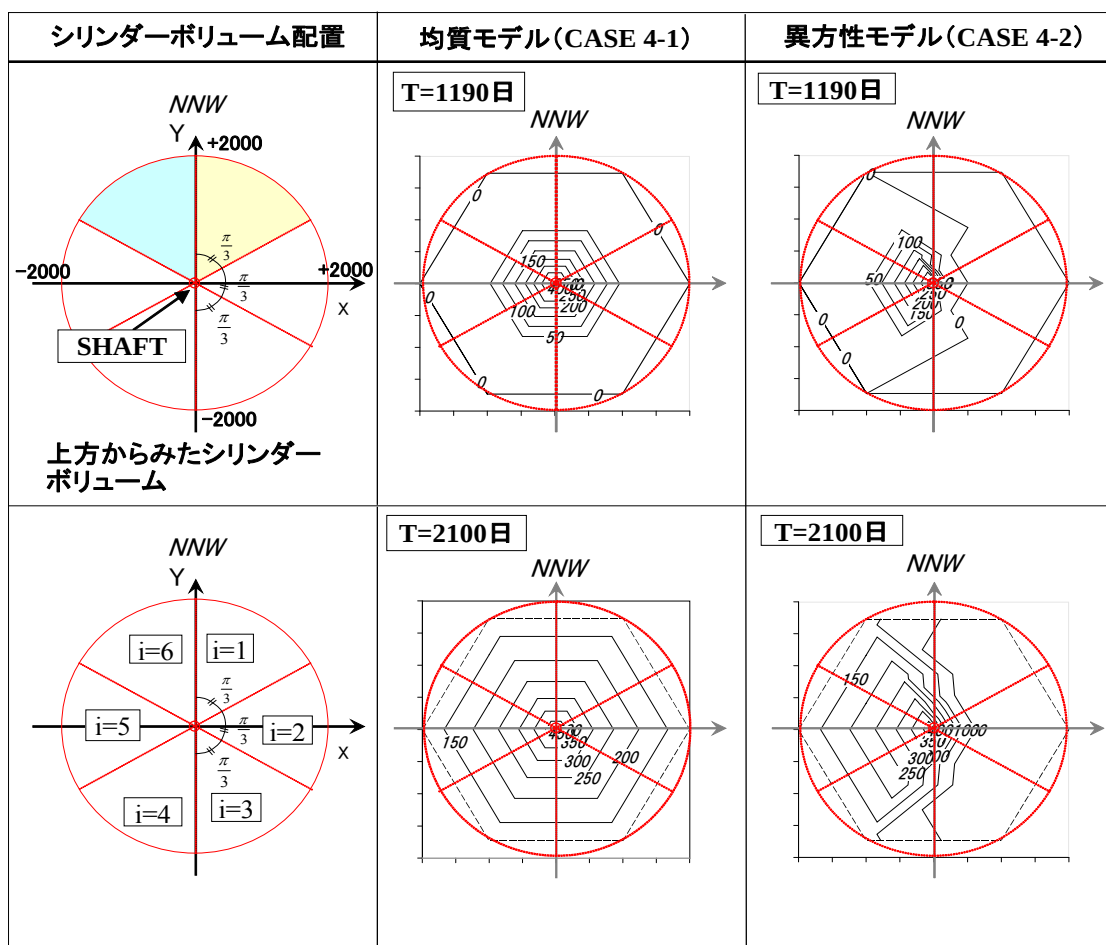


図-8 SWING-SHAFT 法による均質モデルと異方性モデルの比較

する場合、また下部層が上面傾斜している場合の湧水量、地下水面のそれぞれの変化を示す。掘削が進むにつれ地下水位に地層の影響が顕著に表れることが見て取れる。

簡単な事例として、立坑周辺の地盤が均質な場合と不均質な場合の水位低下を図-8に示す。簡易版として、この例では6分割をしているが、分割数を増加させることは容易である。図中の T は経過時間で、今後、掘削進行とともに地下水位がどう低下するかを示している。分割区域の透水性が異なる、すなわち地盤が異方性を示すときの結果も表示している。地盤が均質であれば、水位低下は等方的に進むが、地盤が不均質であれば、水位低下は偏在する。時間を掘削プロセスと対比させて掘削深度に変化させると、現実 に即した解析が可能となる。

5. 今後の課題およびまとめ

前述のように、立坑においては、湧水管理が極めて重要である。水平トンネルのように自由排水が出来ないため、排水をポンプに著らざるを得ない。もしポンプ容量が湧水より小さいか、ポンプの故障が生じると致命的となる。したがって、湧水量の低減のためにグラウチングがしばしば計画される。SWING-SHAFT 法はその点でも迅速な対応が可能で、その場合のモデル化について試算的な考察を行う。

過去の止水モデルの中で最も有名なものは、青函トンネル方式である。その例では、坑壁から全面にわたって前方方向にグラウチングが行われ円錐状に低透水領域が形成された。ここでは、透水性状や地山特性、現場の状況などを勘案し、青函トンネル方式とは異なる方法を考察する。壁面近傍に薄い自然地盤を残し、グラウトで地山内部にドーナツ状の止水域を形成しようとするものである。図-9に提案するモデルは、湧水量の抑制モデルと言われるもので、湧水量の計算過程に抑制効果を考慮する。このモデルは従来のSWING-SHAFT法の簡易な改変で済むが、グラウトでの改良幅や改良後の物性値の解釈に難があるので、さらなる考察が必要である。これについては、地盤・岩盤内でのグラウト挙動のモデル化やグラウトの物理・化学特性の把握など、別の課題が残されており、今後の研究が待たれる。また、SWING-SHAFT法において水理定数を環状に低下させ、効果を表現することも可能であるが、適切な定数の設定、入力 の困難さなど問題点として残る。円筒状の地盤モデルに効率的に任意の物理定数を割り当てるアルゴリズムの開発が必要とされる。

以下に、まとめを記す。

SWING法による地下水情報化施工として、水平坑道については水環境系を考慮した工事の進捗に応じた地下水挙動評価と施工実績に合致した最終的な影響評価を検

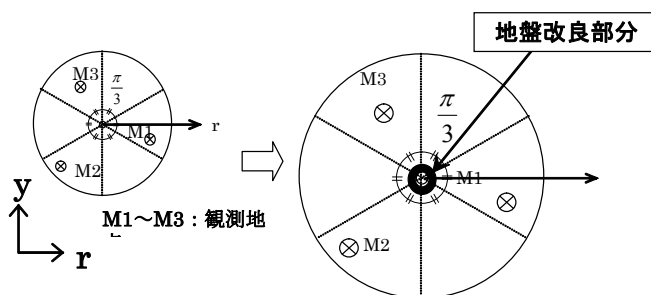


図-9 SWING-SHAFT 法における地盤改良のモデル化

証されており^{[8][9]}、また新しく幾つかの場所で適用が進められている。しかし、立坑については事例がほとんど無く、今後の情報収集が待たれる。立坑は、通常の水平トンネルに比べ、地表での調査方法やデータの取り方がかなり異なる。こうした状況を踏まえて今後の SWING-SHAFT 法の構築に当たる予定である。文中で述べているように SWING 法、ならびに SWING-SHAFT 法は共に簡易計算法である。

したがって、実測データと比較することはもちろんのこと、浸透流解析や修正タンクモデルなどの地下水流動解析と比較検討することが望ましい。

SWING-SHAFT 法は、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が、それなりに解析上の課題が存在するのでそれらを列挙する。

- ・ 地盤モデルの作成が容易である反面、シリンダーモデルの自由度が制限され、複雑な3次元地盤モデルの作成は容易ではない。
- ・ 地盤内の地下水流動は、飽和域のみの解析であり、不飽和域は評価していない。降雨浸透や多層帯水層構造の解析を行うためには、複雑な地層情報が必要であり、入力に手間がかかる。
- ・ 厳密な3次元浸透理論ではないことから、地盤内部における流動メカニズムは評価できない。

これらの注意点を考慮して利用すれば、SWING-SHAFT 法は簡易解析として有用であるが、今後の検証と現場の状況をふまえたさらなる事例解析が必要となる。

参考文献

- 1) 樗木 武：トンネル湧水に関する基礎研究，九州大学工学部，一般研究 255191, p.171, 1979
- 2) 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，第13回地下空間シンポジウム，土木学会，2008
- 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 (SWING 法) の開

- 発, 土木学会第 58 回年次学術講演会講演集, pp.31-32, 2003
- 4) 大西有三, 大津宏康, 高橋健二, 安田 亨 :
Observational Method for Tunnel Construction Considering
Environmental Impact to Groundwater Using The SWING
Method, *ISRM International Symposium 2006*, pp.121, 2006
- 5) 石井政次, 大島洋志, 永橋健三 : Geology and
Hydrology of Rokko Tunnel in New Sanyo Trunk Line,
Quarterly Report of Railway Technical Research Institute, Vol.8
No.4, pp.188-194, 1967
- 6) Sugawara, M., Watanabe, I. : Tank model with snow
component, *Notes, N.R.C.*, No-65, pp.293-298, 1984
- 7) 萩原将文 : ニューロ・ファジィ・遺伝的アルゴリズム,
＜エレクトロニクス実践シリーズ＞ 産業図書
(株) , 1994
- 8) 高橋彦治 : トンネル湧水に関する応用地質学的研究
鉄道技術研究広告, No.279, p.103, 1962
- 9) 大西有三, 大津宏康, 高橋健二, 安田 亨 : 山岳ト
ンネルにおける地下水情報化施工の提案, 土木学会第
59 回年次学術講演会講演集, pp.785-786, 2004

SWING-SHAFT: SIMPLIFIED GROUNDWATER ANALYSIS SYSTEM APPLIED TO SHAFT TUNNEL EXCAVATION FOR ASSESSMENT OF WATER INFLOW

Yuzo OHNISHI, Kenji TAKAHASHI, Xiong JUN and Tetsu KIMURA

Excavation of tunnel in Japan recently faces a lot of difficult conditions in relation to environmental impact. Especially large amount of groundwater inflow in the tunnel construction is very important. This paper describes a new evaluation method (SWING-SHAFT) executed in a mountain shaft (vertical) tunnel. This proposed method is an groundwater evaluation system that pursues the process of the excavation while promptly repeating validation analysis and the groundwater behavior prediction analysis based on the data (inflow to tunnel and porewater pressure measurements) obtained as a result of the tunnel excavation. The basic concept and some examples are shown.