SDA-SWING 法による山岳トンネル施工時湧水量の予測

（株）竹中土木　正会員　○森　守正　澤　徹
正会員　市川　晃央　森　桂一
国土交通省　近畿地方整備局　福井河川国道事務所　澤崎　広一郎　西村　長嗣
パシフィックコンサルタンツ（株）　正会員　安田　亨
京都大学名誉教授　正会員　大西　有三

１．はじめに

トンネル工事における地下水の影響として，大量湧水による切羽崩落やトンネル排水処理の増大が挙げられる．補助工法や処理設備の増設などの必要性を判断するために，現場では迅速かつ正確な湧水量予測が求められているが，既往の地下水予測としての三次元地下水解析は精度の高い水理地質モデルが必要なため時間と労力を要し，また，複雑なモデルであるため逆解析の実施は困難なことが多い．そこで，簡素化したモデルを用いて地下水挙動の逆解析を可能とした SWING（System for Water Information of Ground）法に，観測値を反映させる過程に逐次型データ同化方法（SDA；Sequential Data Assimilation）として EnKF（Ensemble Kalman Filter）を取り入れ，工事で得られた湧水量を反映させた地下水挙動の予測評価法として SDA-SWING 法が開発された．本研究は，この SDA-SWING 法を実際のトンネル工事で取得した湧水記録に適用し，地下水情報化施工手法として用いる本法の妥当性について検証を行ったものである．

２．SDA-SWING 法

SDA-SWING 法の詳細については，参考文献[1),2)]をご参照頂きたい．概略を述べると，SWING 法は，トンネルを縦断方向 20m 程度に区分し，この単位スライスの湧水量を Dupuit の準一様流解析に基づく式および井戸公式から求める．そして，単位スライスの湧水量を縦断方向に足し合わせることで，掘削に伴う湧水量を算出する手法である．各スライスには透水係数が定められており，これを最適化することで掘削方向のトンネル湧水量の将来予測を行う．（図-1）

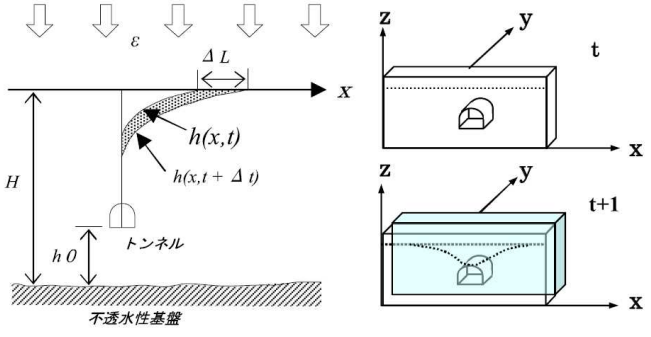

図-1　トンネル湧水量の算定方法

ここで、各スライスにおける透水係数の最適化については，EnKF を用いて自動的に実施する．EnKF は逐次型データ同化手法の一つであり，観測値と予測値から解析値を求める手法である．定められた透水係数から算出した湧水量を予測湧水量とし（一期先予測），この予測湧水量と同時刻の観測湧水量から EnKF の処理を行い（フィルタリング）透水係数を求め，各スライスの透水係数を求めた透水係数に置き換えた上で，新たな透水係数に対応する解析湧水量を算出する．この操作を観測湧水量が得られる毎に実施し，透水係数を更新することで，予測精度の向上を図るものである．（図-2）

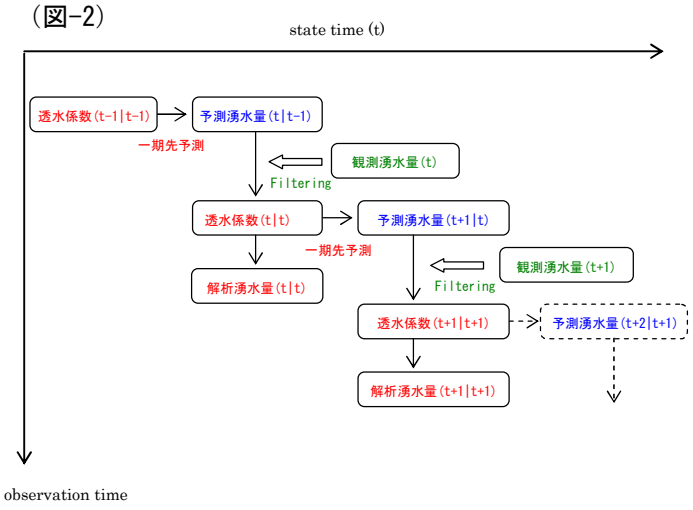

図-2　EnKF による透水係数最適化手順

キーワード　トンネル，地下水，湧水量，SWING 法，データ同化
連絡先　〒558-0012　大阪市中央区本町 4 丁目 1-13　(株)竹中土木　大阪本店　技術・設計部　技術グループ　TEL06-6252-4564

３．適用トンネル工事概要

工事名　：冠山峠道路第 2 トンネル工事
工事場所：福井県今立郡池田町田代地先
工期　　：H26.1.18～H29.5.1
諸元　：トンネル施工延長 L=2,600m（全長 4,800m）
内空断面積 A=48m^2
掘削形式　発破掘削（NATM 工法）
岩種　泥岩，緑色岩類，チャート，砂岩
最大土被り　約 334m

４．適用結果

今回の検討においては，トンネル掘削進捗 0m（事前検討）:Case0，600m:Case1，1,178m:Case2，2,130m:Case3 という 4 つの時点でそれぞれ SDA-SWING 法による解析を実施し，湧水量が実績値と比較してどのように推移するのか検証を行った．

図-3 に各時点における湧水量の解析結果の推移を示す．実績湧水量は，基本的に±1σ の範囲に収まって推移している．特に平均値から-1σ の範囲で実績湧水量が推移しており，地山の透水係数は想定よりも小さく、湧水量は少ないことが伺える．この傾向は事前検討～Case1 時点から Case3 時点まで変わっておらず，従って，掘削初期段階にて解析を実施することにより、その後の掘削における湧水量の傾向を把握できていると言える．また，掘削進捗が進むにつれて+1σ と-1σ の幅が狭まっており，特に-1σ 側において，Case2 時点で将来予測値と実績値がほぼ一致しており，湧水量の傾向が更に顕著に現れており，精度の高い解析結果が得られていると言える．更に，坑口より 843m 地点にて 700ℓ/min 程度の突発湧水が発生し，湧水量が一時的に上昇したが，その後 Case2 時点で見直しを行った結果，先で述べた通り精度の高い解析結果を得ることができた．

５．まとめ

本研究では，SDA-SWING 法を実際のトンネル施工において運用し，一定の掘削進捗毎に湧水量の将来予測を実施した．その結果，掘削初期から解析結果と実績の傾向を把握することができ，さらに進捗が進み取得データが増えるほどこの傾向がより顕著に現れ，精度の高い解析結果を得られることが確認された．更に，突発湧水のような事前の予測が難しい湧水量変化点に際しても，事後に解析の見直しを行うことでその後の湧水量の推移に関して精度の高い解析結果を得ることができた．したがって，SDA-SWING 法は地下水に関する現場での情報化施工手法として非常に有益であると言える．

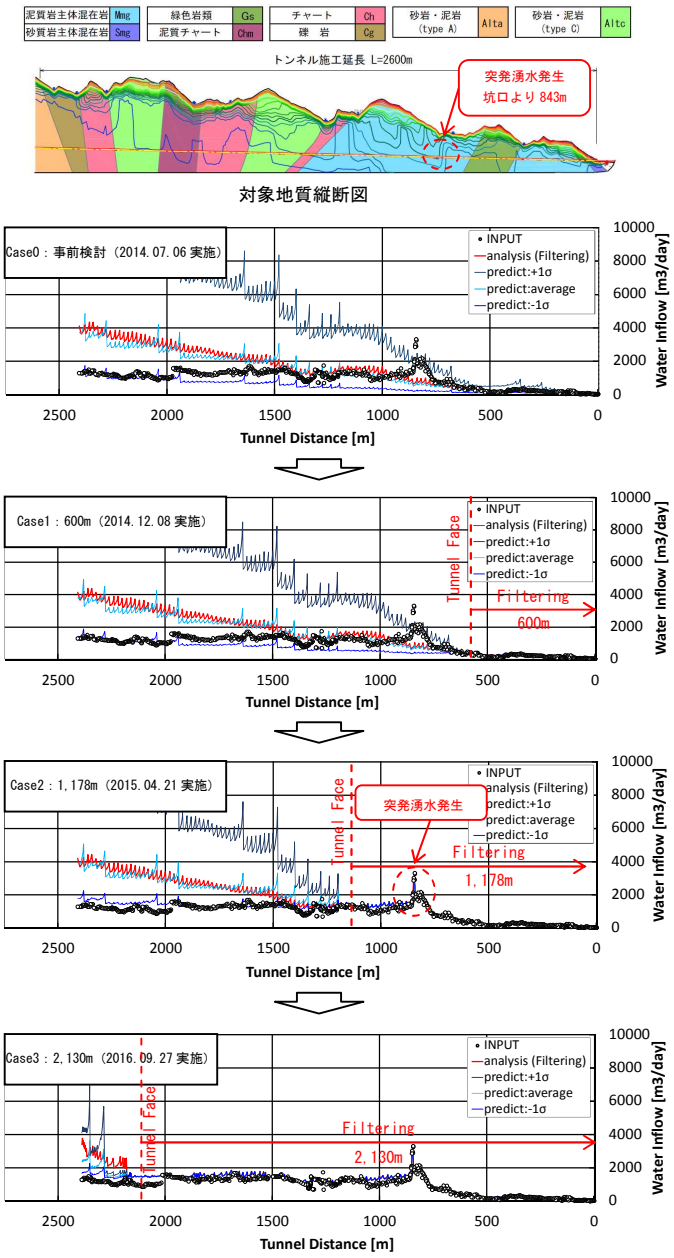

図-3　各進捗における湧水量の将来予測比較

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 法）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) 岸中伸浩，小山倫史，小木曽淳弥，高橋健二，安田　亨，大西有三：SWING 法の高度化およびその実トンネル掘削に伴う地下水問題への適用に関する研究，理論応用力学講演会　講演論文集，62(0)，212，2013