

アンサンブルカルマンフィルタを用いた透水係数の同定

清水建設 正会員 ○山本 真哉

清水建設 正会員 本多 眞

清水建設 正会員 櫻井 英行

1. はじめに

地下水流動評価において網羅的な調査より対象サイト全体の透水係数分布を取得することは不可能であり、また、計測された透水係数値自体はばらつきを持つ。このように、大きな不確さを伴う限られた情報に基づいて信頼性の高い地下水流動モデルを構築することが課題となっている。本研究では、データ同化技術により、継続して取得される地下水モニタリングの結果を利用して透水係数を逐次的に修正し、観測結果を再現できる地下水流動モデルの同定を試みた結果について報告する。

2. アンサンブルカルマンフィルタ

データ同化は観測結果に基づいて数値シミュレーションのモデル変数を最適化する技術であり、本研究ではアンサンブルカルマンフィルタにより地下水流動シミュレーションのデータ同化を行った。これは名前が示すようにカルマンフィルタの派生手法であり、状態空間モデルの確率密度分布を多数の実現値（アンサンブルメンバー）により近似するため、非線形問題に対しても適用できるのが最大の特長である。アンサンブルカルマンフィルタは、通常のカマンフィルタの手続きに準じ、以下のように大きく2つの手順を踏む。

(1) 各アンサンブルメンバーのモデル変数を用いてシミュレーションを実行し、観測結果が得られる時刻までの時間更新を解く。

(2) モデル変数と観測誤差の分散共分散行列から求められるカルマンゲインと、(1)の予測値と観測値の誤差に基づいて状態変数を更新する。

この手順を繰り返すことにより、数値モデルが逐次的に修正されることとなる。

3. 解析条件

実存の地下構造物を対象とした、有限要素法による地下水流動シミュレーションにアンサンブルカルマンフィルタを適用し、提案手法の性能評価を実施した（図1）。対象サイトの水理地質構造は5つの地層区分と計10の亀裂帯で構成されており、これらの透水係数（等方）を推定対象とした。

地下水流動シミュレーションに関しては、飽和・不飽和モデルを使用し、日雨量に応じた地下水涵養や岩盤空洞の内圧等を非定常の境界条件として設定した。透水係数の初期値は対数正規分布から発生させたが、このときの平均値は通常の領域と亀裂帯や風化帯等の高透水と見なせる領域とで異なる値を与えた。また、水頭の初期値には、透水係数を仮定した下で行った定常解析の結果を用いた。

データ同化に用いる観測データは、地下水位（14地点）と岩盤空洞への流量（6領域）の2種類であり、アンサンブルカルマンフィルタによりこれらの観測値を日毎に同化した。このときのアンサンブル数は96とした。なお、観測誤差については、観測項目間で独立な正規分布とし、ばらつきの大きさは各観測値の大きさに応じて設定した。また、地下水流動シミュレーションのモデル誤差については考慮していない。

4. 結果

岩盤空洞への流入量に関する同化結果の例を図2に示す。図中の実線は各アンサンブルメンバー（96ケース）の流入量の解析値から算出した平均値を表している。初期の時間ステップでは解析値は観測値から大きく

キーワード アンサンブルカルマンフィルタ データ同化 地下水流動シミュレーション 観測データ
連絡先 〒135-8530 東京都江東区越中島 3-4-17 清水建設(株) 技術研究所 TEL 03-3820-5928

乖離しているが、データ同化が繰り返されるに従い、次第に観測結果に近づいており、同定した地下水流動モデルにより流入量の大局的な傾向がある程度再現できていることが分かる。同様に、地下水位の同化結果例を図に示す。地下水位についても多くの孔で観測結果を再現できることが確認されたが（図3）、一方で観測値との乖離が大きく、かつ、データ同化による改善が認められない観測孔も一部で存在した。これは元々想定している水理地質構造では、乖離の大きい観測孔周辺の地下水流動を十分表現できないことを示唆していると考えられる。

図は透水係数の推定結果例を表したものである。解析開始直後、各透水係数の推定値（アンサンブル平均）は観測結果に応じて修正されることで大きく変化するが、20日目あたりで一定値に収束し、それ以降は変動がほとんどない。これはサンプルの共分散行列が過小評価されることで観測結果の重みが小さくなり、結果としてモデル変数が修正されない現象が生じていることが考えられる。これには共分散行列を意図的に大きくする共分散膨張法を適用することで同化結果が改善される可能性がある。

5. おわりに

実際の地下構造物を対象に、アンサンブルカルマンフィルタを適用し、観測データに基づいて透水係数を推定した結果、一部の観測を除き、実際の観測結果を概ね再現できる地下水流動モデルを同定することができた。これにより、地下水流動モデルを合理的に構築する方法としてデータ同化が適用できる見通しを得た。

本検討では透水係数のみに着目したが、数値シミュレーションの境界条件や水理地質構造にも不確さは存在する。したがって、透水特性だけでなく、地下水流動モデルに含まれる他の不確実性も含めたモデル同定が今後の課題になる。

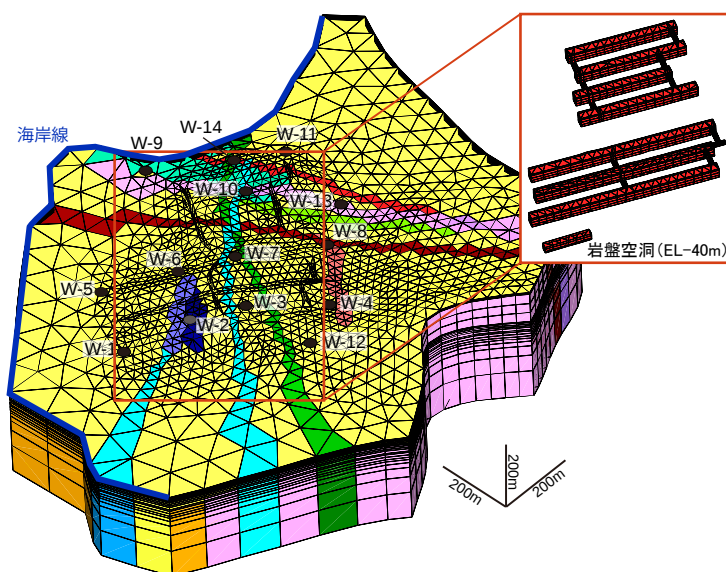


図1 解析領域と地下水位観測孔の位置

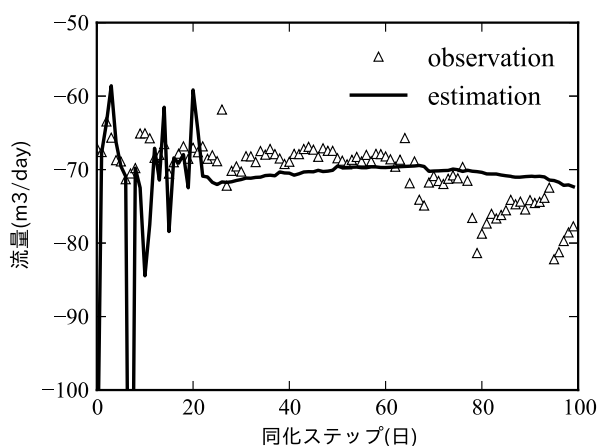


図2 流入量の解析結果

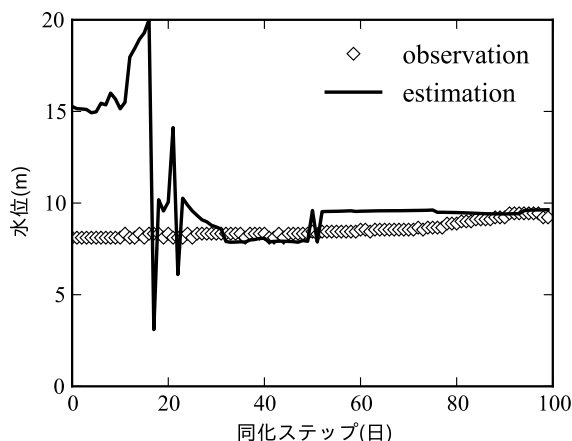


図3 地下水位の解析結果

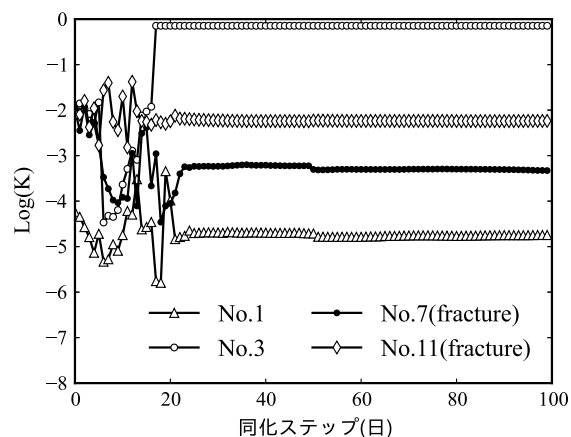


図4 透水係数の推定結果