洪積粘土層の圧密挙動に対する相対誤差によるデータ同化における観測ノイズの影響

大阪産業大学　小田 和広（正会員）　○斉藤 康平（学生会員）
鹿児島大学　伊藤 真一（正会員）

１．はじめに

IoT の普及や通信技術の発展によって多様な計測値を大量かつリアルタイムに収集できるようになってきた現在，それらを積極的に活用して現実の問題を解決しようとする**サイバーフィジカルシステム**や**デジタルツイン**が提唱されている．具体的な方策としては，計測とシミュレーションを密接に連携させる**データ同化**技術の活用が挙げられる．ここで，圧密の問題では，沈下量に加え，間隙水圧が計測される場合が多い．両者は，次元も異なるし，計測するためのセンサーの精度（計測値の誤差）も異なっている．それらに対するデータ同化を通じ，圧密挙動を再現するバランスの取れたシミュレーションモデルを同定することは案外難しい．筆者らは，**異なる種類の計測値が存在する場合のデータ同化**に相対誤差を適用することを試みている[1]．本研究では，**データ同化結果に対する観測ノイズの影響**について考察する．

２．解析の概要

データ同化の対象とした大阪湾の埋立人工島下の Ma12（層厚約 27m）を選んだ[2),3)]．対象箇所で 2006 から 2014 まで沈下量と間隙水圧の計測が行われている．シミュレーションモデルとしては，一次元圧密解析用いた．**図-1** は解析モデルを示している．解析モデル上での沈下量の計測位置は赤丸（1 深度），間隙水圧の計測位置は青丸（7 深度，②～⑧）で示している．**図-2** は解析に使用した圧縮曲線を概念的に示している．一般的な e-logp' 関係によって圧縮曲線をモデル化している．そのため，同定すべきパラメータは，圧縮指数 Cc と過圧密比 OCR になる．これに加え，圧密速度を決定する透水係数 k の 3 つのパラメータについてデータ同化を行う．**表-1** は設定した各パラメータの範囲を示している．この範囲の中でデータ同化を数度繰返し，誤差の総和が定常状態になった時点で解析を終了した．

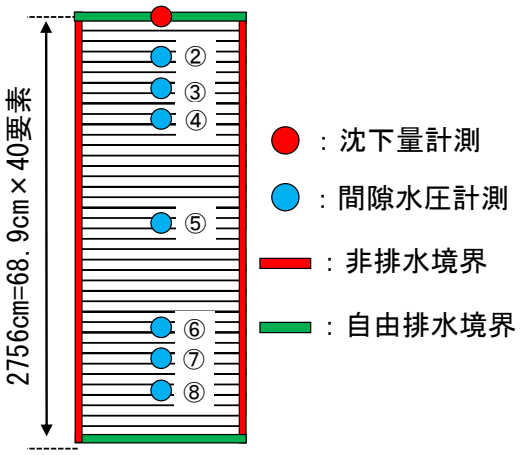

図-1 解析モデル

３．粒子フィルタによるデータ同化と観測ノイズ

データ同化には，粒子フィルタを適用した．粒子フィルタでは，計測値に対するシミュレーション値の適合度を次式の尤度によって見積もる．なお，分散・共分散行列は単位行列としている．

$$w_i = \prod_{j=1}^{m} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{rer_{j,i}^{\ 2}}{2\sigma^2}\right) \tag{1}$$

$$rer_{j,i} = \frac{y_{j,i} - x_{j,i}}{x_{j,i}} \tag{2}$$

ここに，w_i：i 番目の粒子の尤度，σ：観測ノイズの標準偏差，$rer_{j,i}$：相対誤差，$y_{j,i}$：シミュレーションの値および $x_{j,i}$：計測値である．式(1)から分かるように，積の中のいずれかの項が他の項よりも極端に小さい値になってしまうと，尤度はその項によって支配されてしまう．また，σが大きいほど相対誤差の尤度に与える感度が悪くなる．すなわち，適合度の許容性が広くなる．本研究では，尤度が同化計算に直接的に反映される Sequential Importance Sampling[4)]をデータ同化のためのアルゴリズムとして適用した．

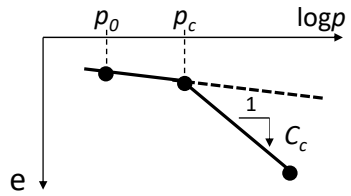

図-2 圧縮曲線の概念図

表-1　設定したパラメータの範囲

	k (cm/s)	Cc	OCR
最大倍率	1.50	1.40	1.04
最小倍率	0.67	0.67	0.96

キーワード　データ同化，現地計測，数値解析，圧密，洪積粘土
連絡先　〒574-8530 大阪府大東市中垣内 3 丁目 1-1　大阪産業大学工学部都市創造工学科　TEL 072-875-3001

© Japan Society of Civil Engineers

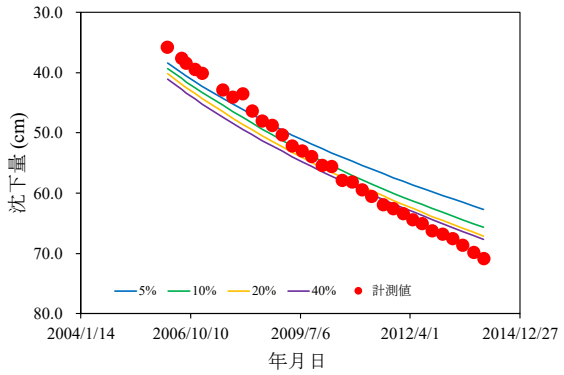

図-3 沈下量の経時変化に対するデータ同化結果

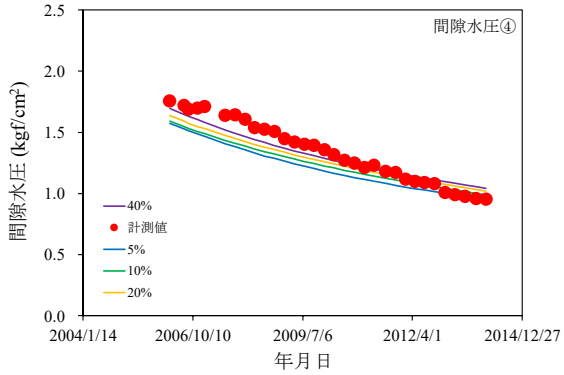

図-4 間隙水圧④におけるデータ同化結果

3．観測ノイズの影響

解析ではσを 5%~40%まで 5%刻みで変化させた計８ケース実施した．**図-3** は沈下量に対するデータ同化結果を示している．なお，データ同化結果は重み付き平均値である．データ同化結果は，2006 では計測値よりも大きく，2014 では小さい．また，σが大きいほど小さな沈下量を与える．さらに，σが 20%と 40%ではほとんど差がない．

図-4 は間隙水圧④に対するデータ同化結果を示している．データ同化結果は 2006 では計測値よりも小さいが，2011 以降はほぼ一致している．また，σが大きいほど間隙水圧は大きくなっている．

図-5 は解析の最終段階における間隙水圧の深度分布を示している．σが大きいほどデータ同化結果における間隙水圧が大きい．また，⑤，⑦と⑧以外は計測値とほぼ一致している．ところで，式(1)から尤度に大きな影響を与えるのは，計測値とシミュレーション値の差が大きい⑤，⑦と⑧である．つまり，データ解析では，この部分を改善しようとして解析が行われる．したがって，これらの部分の改善がモデル全体の再現性の改善に寄与すると考えられる．

図-6 は沈下量と間隙水圧の標準偏差とσの関係を示している．σが 15%以上になると沈下量の標準偏差はほとんど変化しない．一方，間隙水圧についてもσが

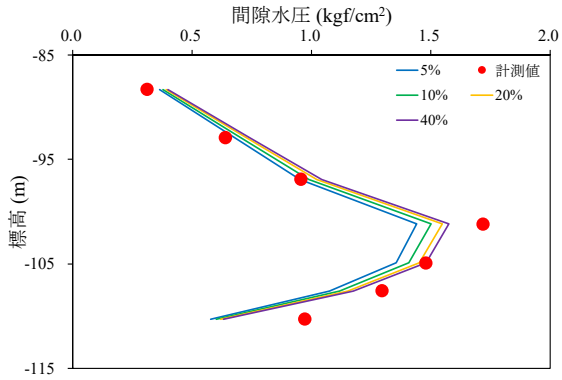

図-5 間隙水圧の深度分布

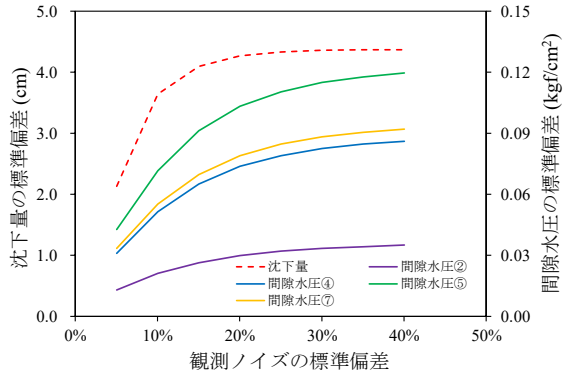

図-6 沈下量と間隙水圧の標準偏差と観測ノイズの標準偏差の関係

15%~20%以上になると曲線の傾きが緩やかになっており，標準偏差に与える影響が小さくなっている．σを小さくすれば，各粒子の違いを小さくすることができるがそれがモデルの精度向上に役立ってはいない．ある程度粒子に多様性を持たせた方が結果的にモデルの適合性が向上する．

4．まとめ

本研究の主な知見を以下に取り纏める．

1) 観測ノイズの標準偏差を大きくするとデータ同化結果の標準偏差は大きくなる
2) 観測ノイズの標準偏差を大きくした方がデータ同化結果の計測値に対する適合性が高まる．

参考文献

1) 原田樹一他：洪積粘土層の圧密挙動に対する相対誤差によるサイバー・フィジカルシステムの効果の考察，第 55 回地盤工学研究発表会，投稿中，2020. 2) 窪田上太郎他：沈下量と間隙水圧の実測値に基づく大阪湾洪積粘土層の圧密挙動に対するデータ同化，第 53 回地盤工学研究発表会，791-792，2018．3) 小田和広他：データ同化による大阪湾洪積粘土の圧密特性の推定，第 54 回地盤工学研究発表会，797-798，2019．4）Doucet, A., Godsill, S. and Andrieu, C.: On sequential Monte Carlo sampling methods for Bayesian filtering, Statistics and Computing, Vol. 10, pp.197-208, 2000 .

© Japan Society of Civil Engineers