

# 粒子フィルタによる大気圧工法を用いた地盤のデータ同化

松江工業高等専門学校	正会員	○柴田俊文
京都大学農学研究科	非会員	増谷 優
京都大学農学研究科	フェロー	村上 章
NTC コンサルタンツ(株)	非会員	藤井 睦
松江工業高等専門学校	正会員	高田龍一

## 1. はじめに

地盤の挙動を予測して設計・施工管理の妥当性を検証する場合、地盤のモデリングや材料特性、初期・境界条件の適切な設定が必要となる。本文では、地盤改良工法として施工事例の少ない大気圧工法が採用された調整池基礎の地盤挙動に対し、粒子フィルタ（以後、PFと称す）を用いたデータ同化<sup>1)2)</sup>により、実際の観測値に基づいて弾塑性構成式のパラメータを同定した。具体的には、SYS カムクレイモデル<sup>3)</sup>を用いた水～土連成有限要素法とPFを用い、その適用性を検討するとともに、各ブロックに一次元モデルをあてはめてパラメータを推定した例との比較を行った。

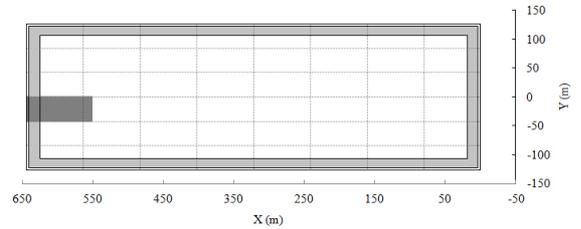


図-1 平面図

## 2. 調整池基礎

対象とした調整池基礎地盤は、地表面から深度 15m 程度以上の沖積層が堆積しており、地盤改良が必要であった。調整池の面積が広大で予定工期が短いことから、通常のプレロード工法や地盤混合処理などの圧密促進工法の採用は困難とされた。そこで地盤改良工法として、バーチカルドレーンを介して地盤に負圧を作用させ、間隙水圧を減少させることで圧密沈下を促進する大気圧工法が採用された。図-1 に調整池基礎地盤の平面図を示す。この地盤を 48 の施工ブロックに分け、各ブロックで大気圧工法载荷中の負圧履歴を測定した。周囲には連続地中壁を設置し、プレロード盛土（薄い灰色の領域）を段階载荷している。各ブロックの中でも、特に腐植土層が比較的広範囲に分布している濃い灰色の領域を対象領域としてモデル化し、解析を行った。図-2 に対象領域内中央 X 方向の垂直断面図を示す。基本的には粘性土層と砂層で構成されているが、深度-3~-4m では腐植土層が分布している。

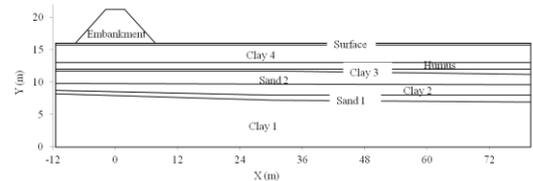


図-2 対象領域の地盤構成

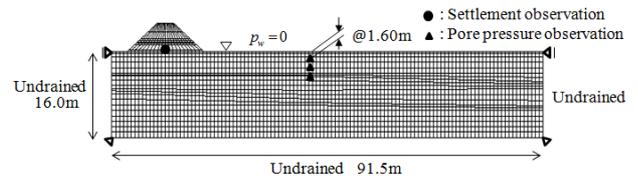


図-3 問題設定と境界条件

## 3. 解析条件

実施工の設計段階では、大気圧工法による間隙水圧の減少分を圧密荷重の増加分と見なし、Barron の理論に基づいた一次元圧密モデルを図-1 の各ブロックについて用いた。しかし、この計算方法は体積変化が応力経路に依存しないと仮定しており、地盤条件や施工過程が複雑な場合に初期条件や境界条件の設定が忠実に考慮できない、大気圧载荷特有の引き込み型の変形を考慮できないといった問題があった。そこで、SYS カムクレイモデルを用いた水～土連成有限要素解析を実施した。図-3 は図-2 断面に関する有限要素メッシュ、境界条件と観測地点である。解析条件の設定にあたっては、大気圧工法に対する既往の解析<sup>4)</sup>を参考にした。図-4 に大気圧工法による負圧とプレロード盛土建設による载荷過程を示す。同定するパラメータとして、地盤の沈下挙動に対して支配的な定数となる粘性土層の圧縮指数  $\lambda$  と透水係数  $k$  (cm/sec) を選定した。室内圧密試験結果より、腐植土層の圧縮指数は粘土層の圧縮指数と相互関係があるものとする。ここでは粒子数を 200 とし、一様乱数により  $0.372 \leq \lambda \leq 1.115$ 、 $-8.0 \leq \log k \leq -6.8$  の範囲で粒子を作成した。盛土直下の地盤挙動を対象とした弾塑性シミュレーションを行い、観測データとして吸引開始 140 日後までの盛土直

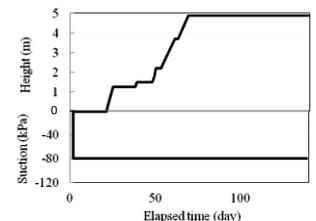


図-4 荷重条件

キーワード：大気圧工法，データ同化，粒子フィルタ

連絡先（住所：〒690-8518 島根県松江市西生馬町 14-4，TEL：0852-36-5260，FAX：0852-36-5218）

下の地表面沈下量を用い、PFによるデータ同化を実施した。

#### 4. データ同化結果

図-5、図-6 に同定パラメータ（各時刻におけるパラメータの重み付き平均）の経時変化を示す。比較対象とした設計段階の推定は、Barron の理論に基づいた圧密沈下量算定結果と観測値の残差二乗和最小とした。 $\lambda$ について、一次元モデルを用いた同定結果と比較すると、PFによる同定パラメータは顕著に小さな値となった（図-6）。また、確率分布の形状に影響を及ぼす分散共分散行列  $R_t = (\xi S)^2$  ( $S$ :観測点で見込まれる最大沈下量) の違いにより、特に  $\lambda$  においては同定パラメータが異なる値になっている。また、負圧载荷開始 140 日後の重みの分布形状を図-7 に示す。ここでは、特に正規分布に近い形状となった  $\xi=0.21$  を適切な分散値とし、その結果のみを示す。圧縮指数と透水係数の重みの分布を比較すると、圧縮指数において重みの大きい粒子が広範囲に分布している。これは透水係数の観測値に対する感度が圧縮指数よりも高いために起こったものと考えられる。しかし、圧縮指数は将来的な変形（残留沈下、リバウンド量）を求めるために重要なパラメータとなるので、本文では  $k$  を固定して  $\lambda$  を再度同定する。透水係数  $k$  を一回目で得られた同定パラメータ  $k = 1.14 \times 10^{-7}$  (cm/sec), 圧縮指数  $\lambda$  は粒子数を 70 とし、一様乱数により  $0.581 \leq \lambda \leq 1.115$  の範囲で作成した。図-8 に負圧载荷開始 140 日後の重みの分布形状を示す。重み分布の形状に鑑み、 $\xi=0.21$  を適切な分散値とした。図-9 に同定パラメータ ( $\lambda=0.820$ ,  $k=1.14 \times 10^{-7}$  (cm/sec)) を用いた順解析結果を示す。図-10 に同定パラメータを用い、対象領域について吸引開始 22, 140 日後の地表面沈下量を解析した結果を示す。室内土質試験結果より、膨潤指数  $\kappa$  は圧縮指数  $\lambda$  に従属させて特定できるものとする、現実に即した圧密特性を同定することで、対象領域について負圧载荷停止、盛土撤去後の残留沈下量、もしくはリバウンド量の予測精度を高めることができると考えられる。

#### 5. おわりに

施工管理の方法が確立されていない大気圧工法が適用された地盤について、施工中に計測した地表面沈下量の結果を用いてデータ同化を行った。既往の研究にある、応力経路を考慮しない圧密沈下計算に基づいたデータ同化の検討に対し、地盤内の応力状態をより適切に表現できる SYS カムクレイモデルを使用し、PF でパラメータ同定を行った。その結果、予測困難な大気圧载荷による沈下挙動を表現することができた。また、PF は解析結果を確率分布の形で表現可能であるため、将来沈下量の確率分布の予測により、負圧载荷停止時期など設計・施工管理の評価に適用可能であると考えられる。

#### 参考文献

- 1) 珠玖隆行, 村上 章, 西村伸一, 藤澤和謙, 中村和幸: 粒子フィルタによる神戸空港島沈下挙動のデータ同化, 応用力学論文集, 13: 99-105, 2010.
- 2) Shuku, T., Murakami, A., Nishimura, S., Fujisawa, K. and K. Nakamura: Data assimilation for experimental behavior of soil deposit by the particle filter, *Soils and Foundations*, 52(2), 2012.
- 3) Asaoka, A., Noda, T., Yamada, T., Kaneda, K. and M. Nakano: An elasto-plastic description of two distinct volume change mechanisms of soils, *Soils and Foundations*, 42(5): 47-57, 2002.
- 4) 金田一広・渡部要一・山崎浩之・新舎 博・椎名貴彦: 水～土連成計算による真空圧密工法の改良メカニズムの検討とその適用例, 地盤工学ジャーナル, 4(3): 245- 258, 2009.

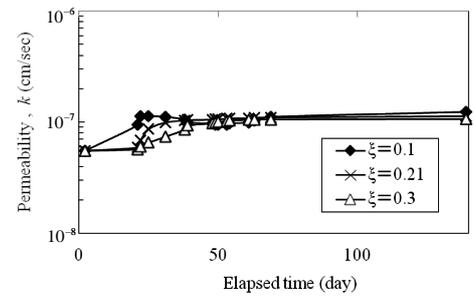


図-5 同定パラメータ  $k$  の経時変化

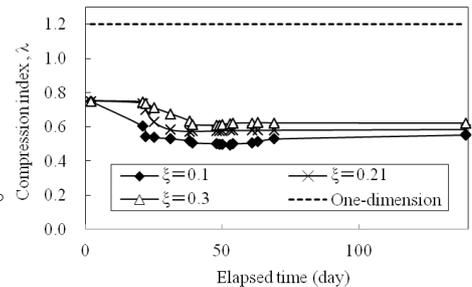


図-6 同定パラメータ  $\lambda$  の経時変化

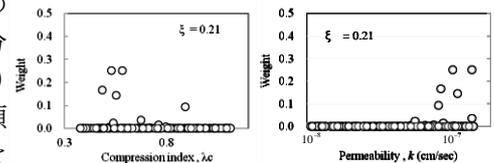


図-7 吸引開始から 140 日目の重みの分布形状

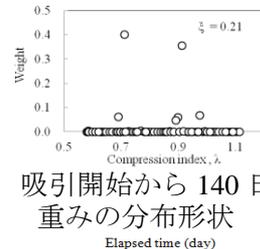


図-8 吸引開始から 140 日目の重みの分布形状

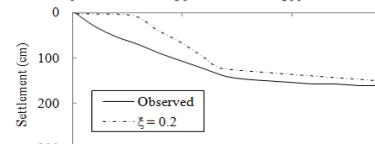


図-9 同定パラメータを用いた順解析結果

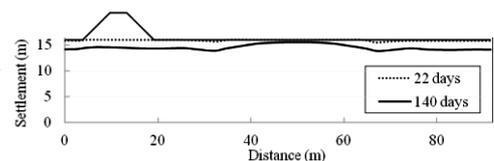


図-10 吸引開始 22 日後、140 日後の沈下量