

# 大気圧工法を施工した 軟弱地盤上の土構造物の挙動予測

柴田 俊文<sup>1</sup>

<sup>1</sup>岡山大学大学院 環境生命科学研究科 講師

地盤の設計・施工管理において、有限要素法による挙動予測の妥当性を検証する場合、地盤のモデル化や材料定数、初期・境界条件を適切に設定することが重要である。本論文では、大気圧工法を使用した調整池基礎の地盤挙動に対し、粒子フィルタ（PF）を用いた逆解析を行い、観測データに基づいて弾塑性構成式のパラメータを同定した。ここで水～土連成有限要素法にPFを適用した場合の妥当性を検討すると同時に、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。さらに、同定パラメータを用い、プレロード盛土撤去後における逆T擁壁と背面盛土の施工にまで解析を継続し、擁壁天端の変位に関して、観測値と解析値で比較・検討を行った。

キーワード：大気圧工法，粒子フィルタ，逆解析

## 1. はじめに

地盤の設計・施工管理を行う際に、有限要素法を用いた挙動予測により妥当性を検証する場合には、地盤のモデル化や材料定数、初期条件、境界条件を適切に設定することが重要である。これらの設定は、施工前の地盤調査の結果から定められるが、地盤の不均一性などの理由により、不完全な設定が内包されることがある。そのため、観測値から地盤定数を求め、その値を用いて挙動予測を行うといった逆解析によるアプローチが有効となる。本論文では、大気圧工法を使用した調整池基礎の地盤挙動に対し、粒子フィルタ<sup>1-3)</sup>（以下、PFと称する）を用いた逆解析を行い、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する。ここでSYS カムクレイモデルを用いた水～土連成有限要素法にPFを適用した場合の妥当性を検討するとともに、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う。さらに、同定パラメータを用い、真空ポンプ停止とプレロード盛土撤去後における逆T擁壁と背面盛土の施工にまで解析を継続し、擁壁天端の変位に関して、観測値と解析値で比較・検討を行う。

## 2. 地盤調査と施工過程

解析に用いた調整池基礎地盤は、深度15m程度以上にわたり粘土層・砂層が交互に堆積しており、腐植土層を間に含むため、地盤改良が必要であった。調整池の面積が広大かつ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。そこでバーチカルドレーンによって地盤に負

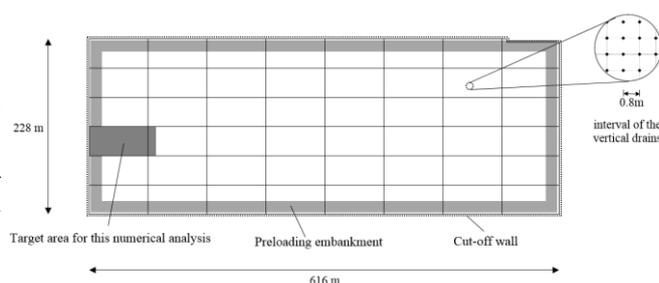


図-1 平面図

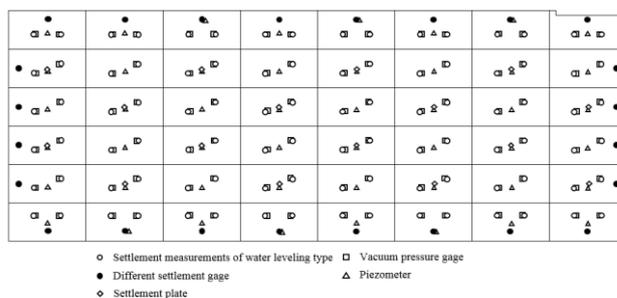


図-2 計測機器の配置位置

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のブロックに分け、各ブロック毎に施工計画（プレロード盛土の盛立・真空ポンプの稼働）を立てている。対象地盤には0.8m間隔でバーチカルドレーンを施工し、周囲には連続地中壁を設置する。真空ポンプの稼働後にプレロード盛土（薄い灰色の領域）を段階的荷重している。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

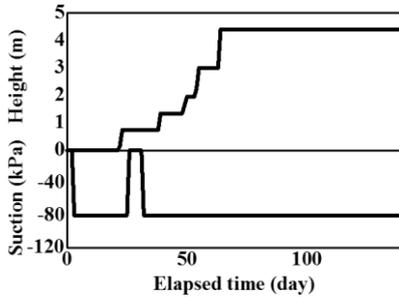
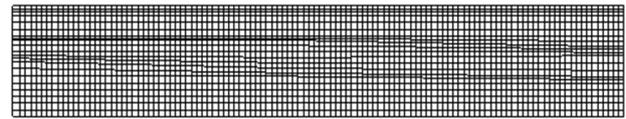


図-3 施工過程

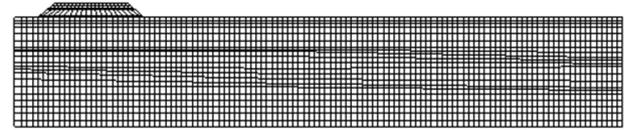
域を対象領域としてモデル化を行う。また、間隙水圧と沈下量を計測するため、各ブロックに観測機器を設置している(図-2)。

実施工の設計段階では、各ブロック毎にBarronの理論に基づいた一次元圧密モデルを用いて計算を行っている。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いるため、本論文では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。プレロード盛土の施工過程と真空ポンプの稼働は、間隙水圧の測定結果と実際の施工計画に基づき、図-3に示すように設定した。また、図-4に示すように真空ポンプの稼働からプレロード盛土の施工・撤去を経て逆T擁壁と背面盛土を施工する過程をモデル化している。施工過程は次の通りである。まず、(a)初期状態で真空ポンプの稼働を開始し、その後(b)プレロード盛土の施工を行う。(c)プレロード盛土が完成し、十分な沈下が認められた後に(d)プレロード盛土の撤去と真空ポンプの停止を実施する。調整池を施工するため、(e)逆T擁壁の設置とともに(f)背面盛土を盛り立てる。

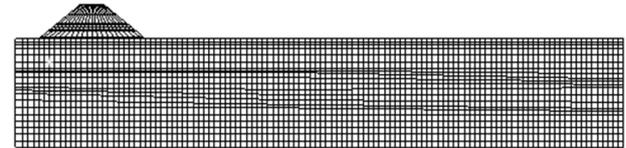
図-5に対象断面の地盤構成図、図-6に有限要素分割図、境界条件と観測機器の配置を示す。前述したように、構成式はSYSカムクレイモデルを採用し、要素は4節点アイソパラメトリック要素を用いている。要素幅はバーチカドレーンの設置間隔0.8mと等しく設定し、要素の両側に図-3で示した間隙水圧を付加することでポンプによる負圧を再現している。ここで図-6に示すOp1とOp2の二点の沈下量を用いて逆解析を実行する。同定するパラメータとして、地盤の沈下挙動に対して支配的な定数となる粘性土層の圧縮指数 $\lambda_c$ と腐植土層の透水係数 $k$ を選定した。ここで室内圧密試験結果より、腐植土層の圧縮指数は粘土層の圧縮指数と相互関係があるものとした。また膨潤係数と圧縮指数も試験結果に基づき比例関係を仮定した。粒子数は200とし、一様乱数により $0.378 \leq \lambda \leq 1.115$ 、 $-6.3 \leq \log k \leq -5.3$ の範囲で粒子を発生させた。作成した粒子に基づいて、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、観測データとして解析開始139日後(真空ポンプ稼働は解析開始から2日後)までの盛土直下の地表面沈下量を用いてPFによる逆解析を実施した。なお139日後の状態



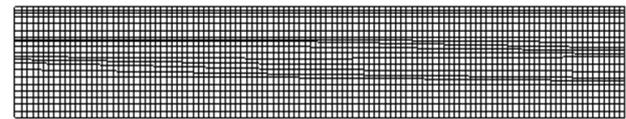
(a) 初期状態



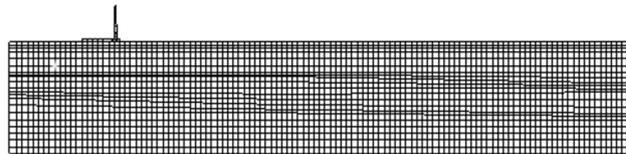
(b) 真空ポンプの稼働とプレロード盛土の施工



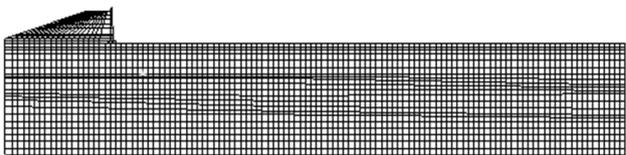
(c) プレロード盛土完成



(d) 真空ポンプ停止とプレロード盛土撤去



(e) 逆T擁壁の設置



(f) 背面盛土の施工

図-4 施工過程のモデル化

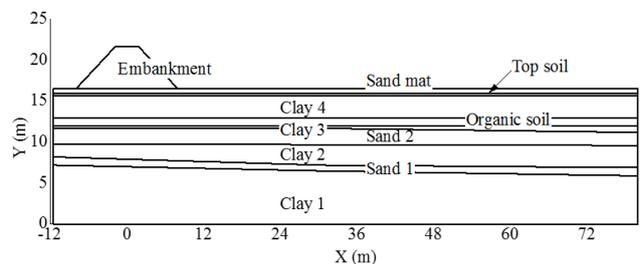


図-5 地盤構成図

は図-4(c)に相当し、後の背面盛土天端の挙動予測は、さらに図-4(f)の状態まで解析を継続させている。分散

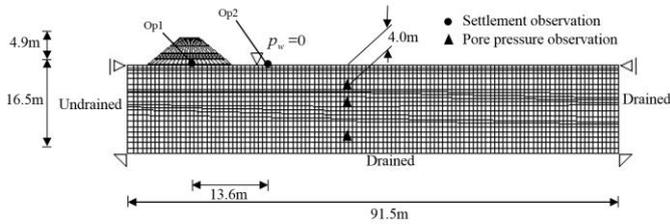
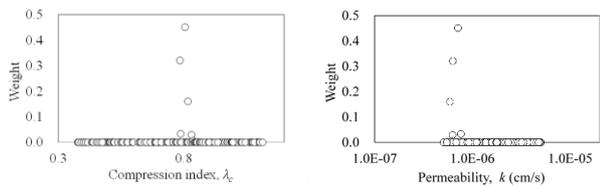


図-6 要素分割, 境界条件および観測位置

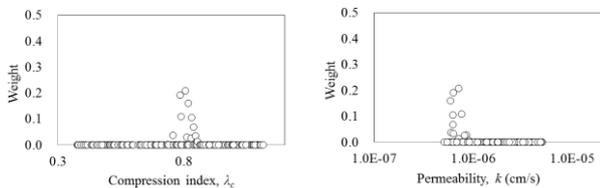
表-1 解析諸元

	$\nu$	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$k$ (cm/s)	$1/R_0$	$1/R'_0$	$M$	$e_0$
Clay/Silt	0.4	14.5	$1.0 \times 10^9$	1.429	2.4	1.2	2.2
Sand	0.3	17.7	$1.0 \times 10^6$	1.429	2.4	1.36	0.821
Organic soil	0.45	11.8	$(2.0 \times 10^6)$	1.429	2.4	1.0	4.921
Topsoil	0.3	14.5	$1.0 \times 10^8$	1.429	2.4	1.2	2.2
Embankment	0.3	14.5	$1.0 \times 10^9$	1.429	2.4	1.2	2.2

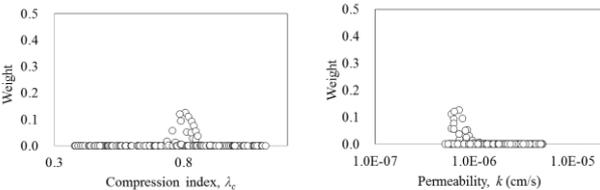
	$\lambda$	$\kappa$	$m$	$a$	$b, c$	$\hat{\alpha}_k$	$\hat{\alpha}_k$
Clay/Silt	(0.740)	(0.09)	2.5	0.2	1.0	0	0
Sand	0.07	0.009	0.01	0.1	1.0	0	0
Organic soil	(3.340)	(0.539)	2.5	0.2	1.0	0	0
Topsoil	0.740	0.09	2.5	0.2	1.0	0	0
Embankment	0.740	0.09	2.5	0.2	1.0	0	0



(a)  $\xi=0.1$ の重み分布



(b)  $\xi=0.2$ の重み分布



(c)  $\xi=0.3$ の重み分布

図-7 観測点Op1のみを用いた際の重み分布 (左: 圧縮指数, 右: 透水係数)

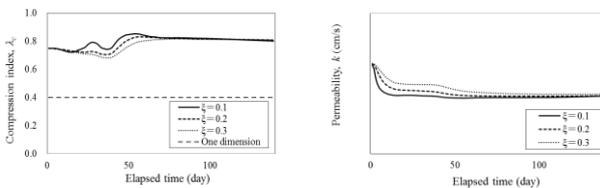
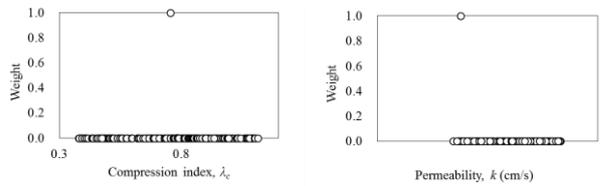
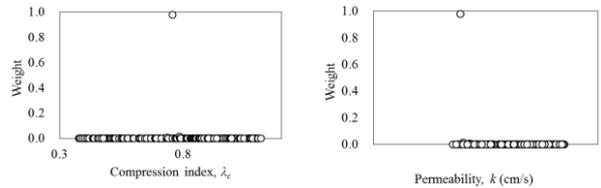


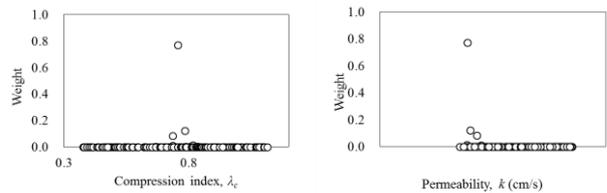
図-8 観測点Op1のみを用いた際の同定パラメータの経時変化 (左: 圧縮指数, 右: 透水係数)



(a)  $\xi=0.1$ の重み分布



(b)  $\xi=0.2$ の重み分布



(c)  $\xi=0.3$ の重み分布

図-9 観測点Op1とOp2を用いた際の重み分布 (左: 圧縮指数, 右: 透水係数)

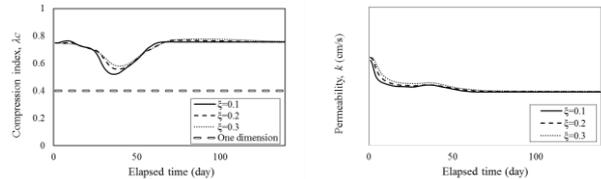


図-10 観測点Op1とOp2を用いた際の同定パラメータの経時変化 (左: 圧縮指数, 右: 透水係数)

共分散行列 $R_i$ は、観測点で見込まれる最大沈下量 $S$ を基準にスカラーパラメータ $\xi$ を用いて設定する。すなわち、 $R_i = (\xi S)^2 \delta_{ij}$  ( $\delta_{ij}$ はKroneckerのデルタ)と設定し、 $\xi$ の値を0.1, 0.2および0.3に変化させ、その影響を検討する。なお、システムノイズは全てのケースにおいて0と仮定し、表-1に示した値(括弧内は同定パラメータの初期値)に基づき、解析を行った。なお、同定値は粒子の重み付き平均より決定した。

### 3. 解析結果

図-7, 図-8に同定パラメータの重み分布形状と経時変化(観測点Op1のみのデータを用いて逆解析を行った場合)をそれぞれ示す。また、観測点Op1とOp2の両方を用いた結果を図-9, 図-10に示す。ここで、スカラーパラメータ $\xi=0.1, 0.2$ および0.3を使用している。ここで重みの大きさは尤度を表し、それぞれ顕著なピークを確認することができる。図-8および図-10では、比

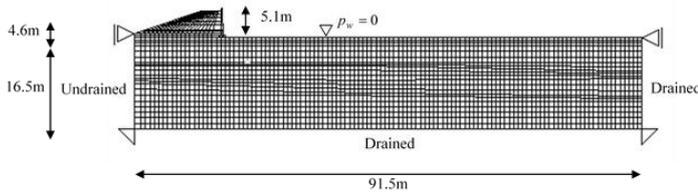


図-11 要素分割と境界条件

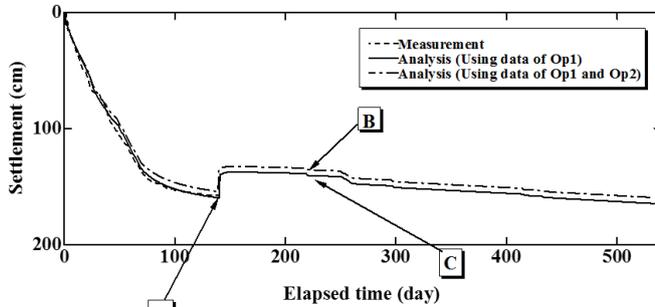
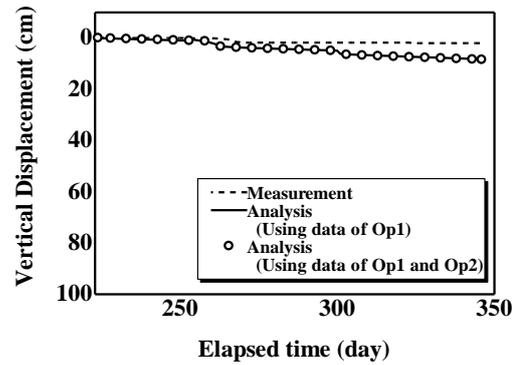


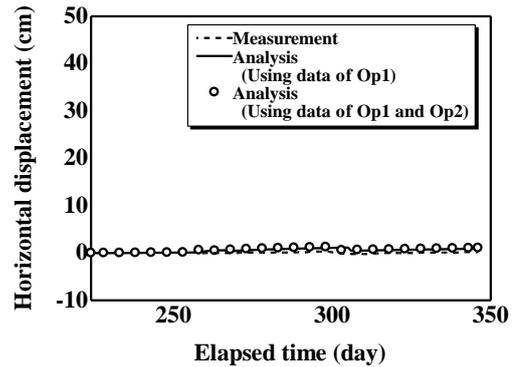
図-12 盛土下の沈下量

較対象とした設計段階の推定について、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、一点鎖線で示している。 $\lambda_c$  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。分散共分散行列の違いにより解析開始から 20~70 日経過時に同定パラメータ  $\lambda_c$  が異なる値になっているものの、139 日経過時にはほぼ同じ値が得られている。同定パラメータ  $k$  についても、139 日経過時にはほぼ同じ値になっていることが確認できる。なお、図-8 では  $\xi=0.1, 0.2$  および  $0.3$  に対して同定値は、 $\log k=6.63 \times 10^7, 6.68 \times 10^7$  および  $7.02 \times 10^7$  であり、かつ  $\lambda=0.801, 0.808$  および  $0.801$  である。図-10 では、 $\log k=5.93 \times 10^7, 5.94 \times 10^7$  および  $6.09 \times 10^7$  であり、さらに  $\lambda=0.756, 0.756$  および  $0.758$  となった。

次に、重み分布でピーク値が大きかった  $\xi=0.1$  のケースで得られた同定パラメータを用いて順解析を行う。吸引停止後、プレロード盛土を撤去し、その後、逆T擁壁と背面盛土を施工する。図-11に、吸引停止後の要素分割図と境界条件を示す。また、図-12に同定パラメータを用いて順解析を行った結果を示す。ただし、この沈下量は図-6におけるOp1の点のものである。ここで、解析開始から139日経過時までは観測値と解析値を、140日目以降は解析値のみを示す。また、図中のAは真空ポンプの停止とプレロード盛土の撤去を、Bは逆T擁壁の施工時を示す。図-12より解析値は良好に観測値を再現しており、解析値はAでの地盤のリバウンドを表していることが確認できる。最後に、図-13は逆T擁壁の天端の変位に関し、観測値と解析値を比較したものである。ただし、水平変位は左側を正として表示している。解析値は観測値をやや過大に評価しているものの、良好に再現していることが確認できる。この若干の差であるが、モデル化



(a) 天端の鉛直変位



(b) 天端の水平変位

図-13 天端変位の比較

をする際に、逆T擁壁直下の浅層混合処理を考慮していない点により発生している可能性が考えられる。

#### 4. まとめ

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逆解析を適用した。逆解析には粒子フィルタを適用し、予測が困難な大気圧载荷による沈下挙動を表わすことができた。また、擁壁天端の変位については、やや過大に評価するものの、精度良く現象を再現することが確認できた。

#### 参考文献

- 1) Shuku, T., Murakami, A., Nishimura, S., Fujisawa, K. and Nakamura, K. : Data assimilation for experimental behavior of soil deposit by the particle filter, *Soils and Foundations*, Vol.52, No.2, pp.279-298, 2012.
- 2) Shibata, T., Nishimura, S., Fujii, M. and Murakami, A. : Evaluation of Strength of Soft Ground Improved by Vacuum Consolidation, *Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA*, Vol.46, No.1, pp.95-102, 2015.
- 3) Shibata, T., Murakami, A. and Fujii, M. : Prediction of embankment behavior of regulating reservoir with foundation improved by vacuum consolidation method, *Soils and Foundations*, Vol.54, No.5, pp.938-954, 2014.