

データ同化による近接施工のリスク評価

若林 孝* 村上 章** 珠玖隆行***

* 日化エンジニアリング株式会社, 〒700-0953 岡山市南区西市 517-2

** 京都大学大学院農学研究科, 〒606-8502 京都市左京区北白川追分町

*** 岡山大学大学院環境生命科学研究科, 〒700-8530 岡山市北区津島中 3-1-1

要 旨

近接施工の際には、設計段階でどの程度の被害が予測され、対策工を施せばどの程度の効果が期待できるかを定量的に評価した上で対策工を決定することが重要である。本研究では、近接施工の管理基準値としてリスクに着目し、データ同化に基づいた新たなリスク評価手法の構築を試みる。はじめに、近接施工に伴う地盤挙動の予測手法として、弾塑性構成モデルを用いた土-水連成有限要素法に着目し、実観測値を用いてその有効性を実証した。その後、予測精度の向上を目的に、シミュレーションモデルと観測値を組合せるデータ同化を適用し、近接施工における地盤の変形挙動評価、及びリスク評価への適用性について考察した。その結果、粘性土地盤を対象とした近接施工問題について、土-水連成弾塑性有限要素解析は、精度良く変形予測ができることを確認した。また、粒子フィルタを用いたデータ同化により、実観測値を説明しうる弾塑性パラメータが同定できること、及び粒子フィルタの計算アルゴリズムを近接施工のリスク評価に応用できることを示した。

キーワード：近接施工，データ同化，意思決定，リスク評価，土-水連成解析，弾塑性解析，粒子フィルタ

1. はじめに

近接施工の際には、設計段階でどの程度の被害が予測され、対策工を施せばどの程度の効果が期待できるかを定量的に評価した上で対策工を決定することが重要となる。著者らは、吉野川下流域農地防災事業において、鋼矢板締切りによる近接施工の計測管理と変状（被害）の分析を平成10年度から継続的に行い、その結果に基づいて、ロバストな意思決定手法の構築を目標に、「仮設構造物設計・施工の手引き」（中国四国農政局四国東部農地防災事務所，2010）を策定した。その中で、地表面沈下量の予測法と許容沈下量を定め、既設構造物への影響の抑制と、対策工事費の適正化を両立できる意思決定手法を提案した（若林・永木，2011）。この手法により一定の成果が得られたものの、近接施工時の変形量やリスク、対策工の効果を定量的に評価するまでには至っていない。また、この方法は、鋼矢板締切りを適用する開削工事の実測データに基づくため、特殊な自然条件や施工法に対して適用できない問題がある。

そこで、「定量的な評価」をキーワードに、近接施工の新たな影響評価手法の構築を試みる。はじめに、近接施工に伴う周辺地盤の変形予測手法として、弾塑性モデルを用いた土-水連成有限要素法（以下、「土-水連成FEM」と呼ぶ）に着目し、実観測値との比較により、その有効性について考察する。その後、予測精度や信頼性の向上を目的として、数値シミュレーションと観測値を組合せるデータ同化を適

用し、近接施工の変形予測への適用性について検証するとともに、リスク評価への応用方法を検討する。

2. 近接施工における地盤の変形挙動評価法

本章では、近接施工時の地盤の変形挙動評価手法を整理し、それらの特徴や問題点についてまとめる。

2.1 変形評価手法の分類

本節では、農業農村整備事業で頻りに遭遇する開削工法の近接施工問題に着目し、その変形評価方法を整理する。

近接施工による周辺への影響を検討する方法として、大きく4つの方法に分けることができる。

- (1) 近接程度の判定による方法
- (2) 過去の実績による方法
- (3) 土留め壁の変形から沈下量を予測する方法
- (4) 有限要素法による方法

近接施工による既設構造物や周辺地盤の変形を定量的に予測し、影響の程度を評価することは、多くの手間と費用がかかるため、ほとんどの設計指針では、簡単な指標により近接程度の判定を行う(1)の方法が示されている。例えば、「近接施工設計施工要領(案)」（建設省土木研究所，1983）では、土留め背面地盤のすべり線を対数線もしくは主働崩壊角と仮定し、すべり領域と既設構造物の関係から、影響外範囲、要注意範囲、影響範囲を判定し、対策工の要否

判定指標とする。

過去の実測データを基に、影響要因と土留め背面地盤沈下の関係をまとめた(2)の方法を大別すれば、次の3つがあげられる。1) 地盤種別ごとに沈下量と土留め壁からの距離を掘削深さで除した無次元化量の関係で整理した方法(Peck, 1969), 2) 多数の実測データを基に、数量化理論を用いた要因分析結果から主要因を組み合わせて表される掘削係数を定義し、最大沈下量との関係を整理した方法(杉本, 1986), 3) 地盤の N 値と土留め壁の剛性などから相対剛性と等価剛性を求め、最大沈下量と最大沈下発生位置を求める方法(小島ら, 2000)である。これらの手法は、地表面沈下の影響範囲や、地盤改良など対策を用いない場合に、沈下量の目安として用いられる。

(3)の土留め壁の変形から沈下量を予測する方法には、1) 土留め壁の最大変位量から最大沈下量を求める方法(杉本・佐々木, 1987; 丸岡・幾田, 1986), 2) 土留め壁のたわみ面積から沈下面積の関係を求める方法(青木ら, 2000; 日本建築学会, 2002), 3) 土留め掘削時の変形分布からすべり面を仮定する方法(Roscoe, 1970; 青木ら, 1990)がある。この方法は、弾塑性法による土留め壁の設計法(例えば、日本道路協会, 1999)で土留め壁の変位が精度良く求められ、地盤改良などの対策工の効果を地盤沈下量予測に反映できるため、設計指針にも示されている。

(4)の有限要素法は、土留め壁を含む地盤全体をモデル化し、数値解析により地盤の変形を求める方法である。土留め壁変位に伴う周辺地盤への影響予測法として用いられる有限要素解析法には、「強制変位法」と「逐次解析法(節点力解放法)」の2つがある。それぞれの概念を Fig.1 (地盤工学会近接施工編集委員会, 2010) に示す。「強制変位法」は、弾塑性法による土留め壁の設計法などで求めた土留め壁の変位を有限要素法解析モデルの土留め壁部分に強制変位として作用させ、周辺地盤の変位を求める方法である。「逐次解析法」は、土留め壁と地盤を一体としてモデル化し、掘削前の地盤の初期応力を掘削に応じて掘削面に解放力として作用させ、逐次解析により周辺地盤の変位を求める方法である。

多くの実務で用いられている地盤の力学モデルは、線形弾性モデルを用いた全応力解析であり、解析に必要な地盤

定数が少なく、さらに、その値を容易に決定することができる。しかしながら、実際の地盤材料の応力-ひずみ関係は非線形であり、かつ応力履歴によりその挙動が変化する。このような挙動を表現するためには、弾塑性構成モデルを用いた有効応力解析が必要となる。最近では、Cam-clay モデルや関口・太田モデルなどの弾塑性モデルが、公開された FEM プログラムでも標準的に使用できる。弾性モデルを用いた解析と比較して、解析に必要な地盤定数の多さが問題となるが、簡単な物理試験から定数を決定する手順も提案されているため、弾塑性構成モデルを用いた土-水連成解析も実務レベルで使用できる環境にある。

実務で多く用いられる「強制変位法・線形弾性モデル」は、解析領域の影響を大きく受けるため、掘削される深さと幅が大きいほど掘削底面に作用する掘削解放力が大きくなる。その結果、リバウンドが地中深くまで生じ、沈下量を過小に評価してしまうことが問題となる。このため、側方境界及び下方境界までの距離を掘削規模に応じて適切に設定する必要がある。また、土留め工の変位と地盤変位を異なる手法で解析することは、煩雑であるだけでなく、一貫性がないという問題もある。本文で着目する「逐次解析法・土-水連成弾塑性モデル」は、それに替わる手法として、実現場での適用が期待される。

2.2 本研究の課題

理想とする近接施工の PDCA サイクル (Fig.2) を、Plan=近接施工対策の設計, Do=近接施工の実施, Check=近接施工の計測管理, Act=対策工法の改善と考えた場合、観測施工に留まらず、計測管理結果を次工区の設定に繋げるサイクルが重要である。そのためには、より精度の高い手法で地表面沈下量の予測を行うことと、キャリブレーションにより予測設計の物性値を見直すことが重要である。

前節で述べたとおり、近接施工の沈下を予測する方法は種々提案されているが、予測精度の向上と観測結果のキャリブレーションを考えた場合、有限要素法が望ましい。有限要素法の中で多く適用されている「強制変位法・線形弾性モデル」は、砂や砂礫地盤では実用上問題ない精度で地表面沈下量を予測できるが、粘性土地盤では地表面沈下量が過少となる傾向を確認した。そこで、粘性土地盤での精

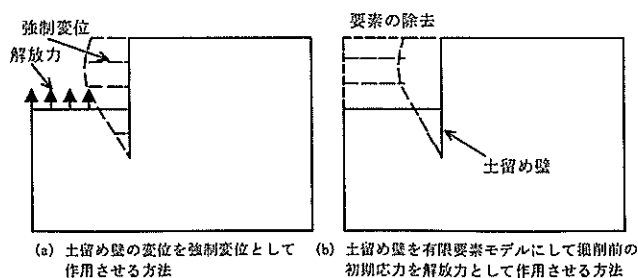


Fig.1 有限要素法による地盤の変位予測法
(地盤工学会近接施工編集委員会, 2010)
Prediction of ground displacements using FEM (JGS, 2010)

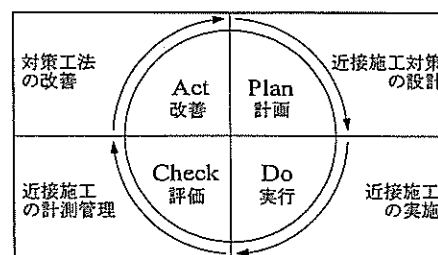


Fig.2 PDCA サイクル
PDCA cycle

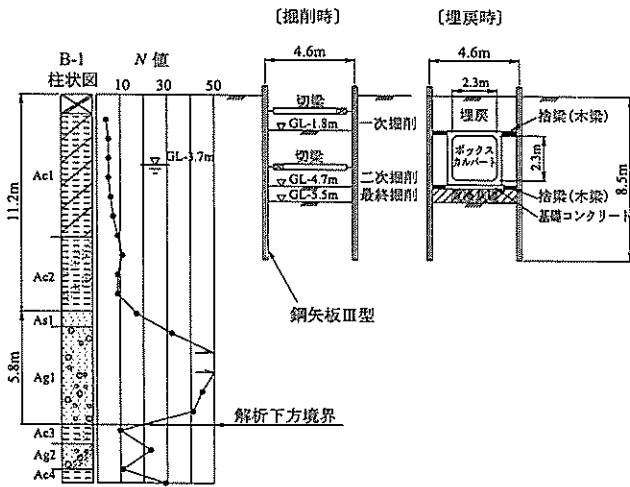


Fig.3 施工断面図
Schematic illustration of the excavation work

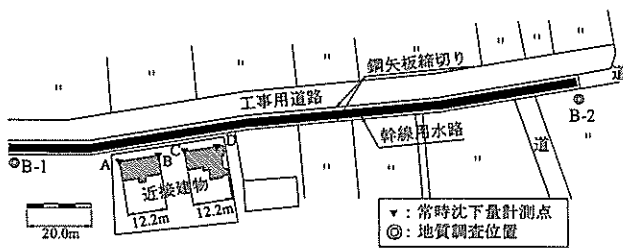


Fig.4 計測点配置図
Placement of measurement devices

度の向上や、掘削～埋戻までの複雑な施工過程の解析を目的に、関口・太田モデル (Sekiguchi and Ohta, 1977) を用いた土-水連成 FEM プログラム DACSAR (Iizuka and Ohta, 1987) に着目し、粘性土地盤の開削工事に対する土-水連成 FEM の適用性を確認した。

3. 土-水連成弾塑性有限要素解析による変形解析

3.1 実測現場の概要

本対象は、徳島県吉野川下流域に位置する用水路（箱形暗きょ）の開削工事である。Fig.3に施工断面を示す。GL-11.2 m までが沖積粘性土で、それ以降が、沖積砂質土、礫質土及び粘性土の互層である。最上層の沖積粘性土層は、上層 (Ac1) が N 値 5 程度の粘土混じりシルトで、下層 (Ac2) が N 値 10 程度の砂質シルトからなる。その下の砂質土層 (As1) は、 N 値 17 程度の砂で、その下方に N 値 30～50 程度の砂礫層が分布する。施工時期の平均地下水位は、GL-3.7 m である。

掘削規模は、幅 4.6 m、深さ 5.5 m であり、土留め工の形式は、切梁式鋼矢板である。鋼矢板の規格はⅢ型で、近接構造物への影響を抑えるため、建物に近接する側の鋼矢板は残置した。

近接家屋における地盤沈下量の計測位置を Fig.4 に示す。

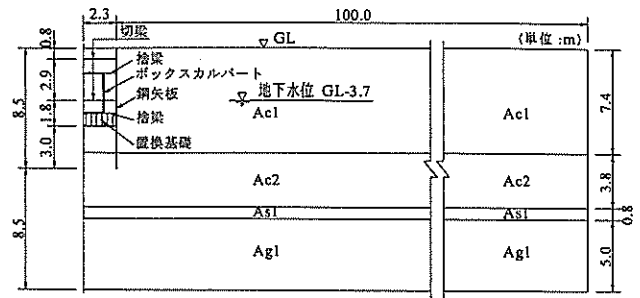


Fig.5 解析モデル
Cross section of the ground to be analyzed

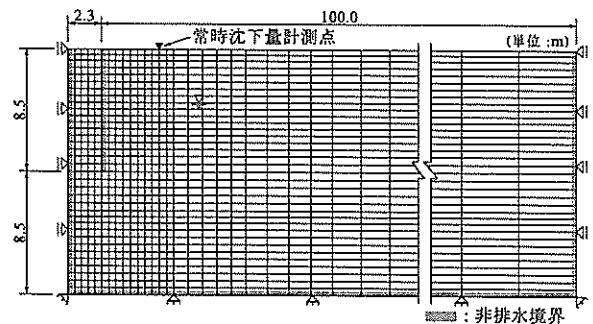


Fig.6 有限要素メッシュと境界条件
Finite element mesh and the boundary conditions

3.2 解析モデルの概要

3.2.1 解析領域

解析モデルは、左右対称の二次元平面ひずみ条件を仮定し、対称軸を鉛直ローラーとする半断面モデルとした。Fig.5に解析モデルを、Fig.6に解析メッシュを示す。側方境界までの距離は、掘削の影響を避けるために 100 m と設定した。下方境界までの距離は掘削幅の 3 倍程度の地層境界までとした。

3.2.2 境界条件

側方の境界条件は鉛直ローラー（水平変位のみ固定）、下方の境界条件は完全固定（水平変位、鉛直変位とも拘束）とした。水理境界は、下方境界と側方境界及び鋼矢板壁を非排水境界に、地下水位が位置する GL-3.7 m に自由水面を設定した。掘削及び埋戻段階の施工面は排水境界（自由水面）とした。

3.2.3 構成モデル

構成モデルは、粘性土層 (Ac1, Ac2) に弾塑性、砂質土層 (As1) 及び礫質土層 (Ag1) に線形弾性モデルを適用した。鋼矢板及び箱形暗きょにはビーム要素を用いた。切梁及び捨梁にはトラス要素を用い、軸剛性は、奥行き方向の間隔に応じ、単位奥行き当たりの物性値に換算した値を用いた。また、鋼矢板と背面地盤の接触面には、摩擦や剥離を表現するためにジョイント要素を配置した。ジョイント要素の物性値は、本多 (1998) の提案値を参考に、以下の値を採用した。

$k_s=10$ (kN/m²), $k_n=5,000$ (kN/m²), $c=0$ (kN/m²), $\tan\phi = \tan\delta$
ここに、 k_s :せん断剛性、 k_n :垂直剛性、 c :粘着力、

δ : 壁面摩擦角 $=2/3 \phi'$, ϕ : 内部摩擦角.

3.2.4 パラメータの設定

対象エリア周辺で行われた土質試験結果を Fig.7 に示す. 図中の●は施工エリアから 150 m 以内で行われた試験値であり, サンプリング位置を Fig.4 に示す. ○は 1,500 m 以内の試験値であり, 参考値である. 入力パラメータを Table 1 に示す. これらは, Fig.7 に示す土質試験結果を基にしたものであり, 弾塑性モデルのパラメータは Fig.8 に示す Iizuka and Ohta (1987) の手順を援用して求めた. Fig.8 における丸囲いのパラメータは, 土質試験結果から求めたものであり, 四角囲いのパラメータは, 試験値からの関係式や理論式から

求めたものである. ここで, 地下水位以浅の圧密試験に欠測があったため, 地下水位以深の試験値を外挿して求めた. 透水係数については異方性を考慮した. すなわち, k_v (垂直方向透水係数) に単孔式透水試験値を用い, k_h (水平方向透水係数) を k_v の 10 倍とした (例えば, 地下水ハンドブック編集委員会, 1979).

線形弾性モデルのパラメータは, 標準貫入試験で得られる N 値からの推定式 $E=700N$ (kN/m^2) により求めた.

3.2.5 施工過程

工事の施工過程を Fig.9 に示す. 解析では, この施工過程を忠実に再現し, 掘削から埋戻完了後 18 日目 (掘削開始から 54 日目) までを対象に解析した.

Table 1 解析に使用した土質定数
Material properties

地層	深度 (m)	γ (kN/m^3)	OCR	I_p	M
Ac1-1	0.0~3.7	19.1	6.5~2.7	12.7	1.36
Ac1-2	3.7~7.4	7.8	2.5~2.1	25.2	1.15
Ac2	7.4~11.2	7.8	2.0~1.7	25.2	1.15
As1	11.2~12.0	9.0	$E=1.19 \times 10^4 \text{ kN/m}^2$ $\nu=0.3$		
Ag1	12.0~17.0	10.0	$E=2.24 \times 10^4 \text{ kN/m}^2$ $\nu=0.3$		

地層	深度 (m)	Λ	D	K_0	K_i
Ac1-1	0.0~3.7	0.70~0.72	0.0179 ~0.0239	0.45	1.11~0.73
Ac1-2	3.7~7.4	0.73~0.75	0.0270 ~0.0355	0.52	0.77~0.71
Ac2	7.4~11.2	0.76~0.77	0.0387 ~0.0486	0.52	0.69~0.66
As1	11.2~12.0				0.50
Ag1	12.0~17.0				0.50

地層	深度 (m)	ν'	λ	κ	ϕ'
Ac1-1	0.0~3.7	0.31	0.063 ~0.082	0.019 ~0.023	33.6
Ac1-2	3.7~7.4	0.34	0.090 ~0.116	0.024 ~0.029	28.9
Ac2	7.4~11.2	0.34	0.125 ~0.155	0.031 ~0.036	28.9
As1	11.2~12.0				
Ag1	12.0~17.0				

地層	深度 (m)	e_0	ν_0	α
Ac1-1	0.0~3.7	0.82	9.47×10^{-6} ~ 1.22×10^{-5}	0.00139 ~0.00179
Ac1-2	3.7~7.4	1.13	1.15×10^{-5} ~ 1.48×10^{-5}	0.00170 ~0.00218
Ac2	7.4~11.2	1.13	1.60×10^{-5} ~ 1.98×10^{-5}	0.00236 ~0.00292
As1	11.2~12.0	0.50		
Ag1	12.0~17.0	0.50		

地層	深度 (m)	k_h (m/d)	k_v (m/d)
Ac1-1	0.0~3.7	3.27×10^{-4} ~ 8.02×10^{-4}	3.27×10^{-5} ~ 8.02×10^{-5}
Ac1-2	3.7~7.4	1.24×10^{-3} ~ 4.47×10^{-3}	1.24×10^{-4} ~ 4.47×10^{-4}
Ac2	7.4~11.2	7.15×10^{-3} ~ 2.26×10^2	7.15×10^{-4} ~ 2.26×10^{-3}
As1	11.2~12.0	8.64	8.64×10^{-1}
Ag1	12.0~17.0	8.64	8.64×10^{-1}

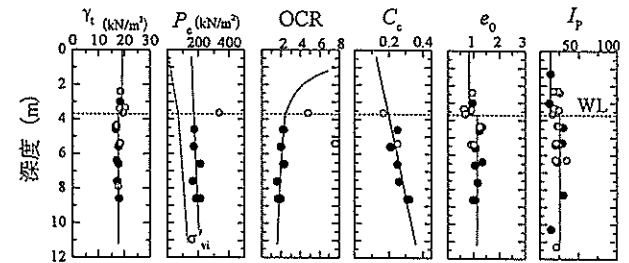
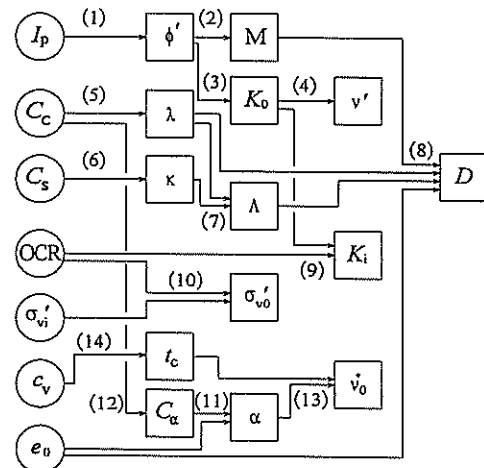


Fig.7 地盤定数
Profile of some geotechnical properties of soil deposit



- (1) $\sin \phi' = 0.81 - 0.233 \log I_p$; Kenney (1959) (I_p : 塑性指数)
- (2) $M = 6 \sin \phi' / (3 - \sin \phi')$ (M : 限界状態指数)
- (3) $K_0 = 1 - \sin \phi'$; Jaky (1944) (K_0 : 静止土圧係数)
- (4) $\nu' = K_0 / (1 + K_0)$ (ν' : 有効ポアソン比)
- (5) $\lambda = 0.434 C_c$ (λ : 圧縮指数)
- (6) $\kappa = 0.434 C_s$ (κ : 膨潤指数)
- (7) $\Lambda = 1 - \kappa / \lambda$ (Λ : 非可逆比)
- (8) $D = \lambda \Lambda / M (1 + e_0)$; Ohta (1972) (D : ダイレイトンシー係数)
- (9) $K_i = K_0 \text{OCR}^{0.54 \log(1 - I_p/100)}$; Alpan (1967) (K_i : 原位置静止土圧係数)
- (10) $\sigma'_{vo} = \text{OCR} \cdot \sigma'_{vi}$ (σ'_{vo} : 先行圧密荷重, σ'_{vi} : 原位置有効土かぶり圧)
- (11) $\alpha = 0.434 C_c / (1 + e_0)$ (α : 二次圧密係数, e_0 : 初期間隙比)
- (12) $C_\alpha = 0.04 C_c$ (C_α : 二次圧密速度)
- (13) $\dot{\nu}_0 = \alpha / t_c$ ($\dot{\nu}_0$: 初期体積ひずみ速度)
- (14) $t_c = t_{90} = H^2 T_v (U=90\%) / c_v$ (t_c : 一次圧密終了時間, c_v : 圧密係数)

Fig.8 構成パラメータ決定手順 (Iizuka and Ohta, 1987)
Determination of constitutive parameters (Iizuka and Ohta, 1987)

3.3 解析結果

鋼矢板背面地表面沈下量について、施工段階ごとの解析値と埋戻完了後の観測値を Fig.10 に示す。なお、対象とした現場では、土留め壁の変位計測がなされていないため、鋼矢板背面地表面沈下量のみを解析の対象とした。

土-水連成 FEM から得られた結果は、観測点 A~D の地表面沈下量と良く一致した。経過時間と地表面沈下量の関係について、観測点 A~D の平均値と解析値を対比した (Fig.11)。観測点 A~D は、土留め壁からの距離が同じであるにもかかわらず、地表面沈下量の観測値に最大 6 mm の差が見られた。近傍の地層構成から地盤構造の違いに起因するとは考えられないことから、施工や観測に基づく誤差が大部分を占めると考えられる。実現場においては、状況判断の上で、安全側として観測値の最大値を用いる場合もあるが、事前に観測値の誤差を想定することは困難である。また、施工や観測に基づく誤差は小さくすることが可能であるため、本文では観測値の相違を論じず、平均値を用いて分析・評価を行った。

20 日目 (掘削段階~第 2 段切梁撤去前) までは、解析値

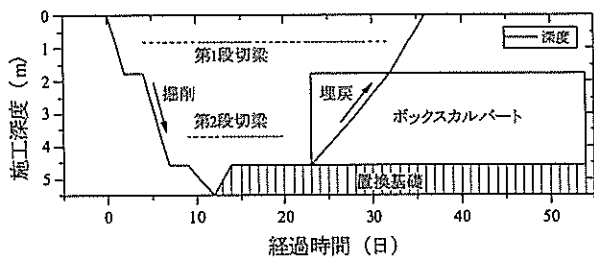


Fig.9 施工過程
Construction process

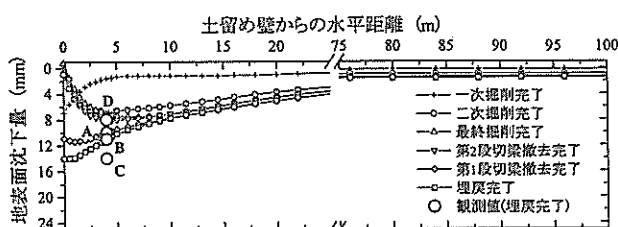


Fig.10 鋼矢板背面沈下量
Settlement of the ground behind the sheet pile

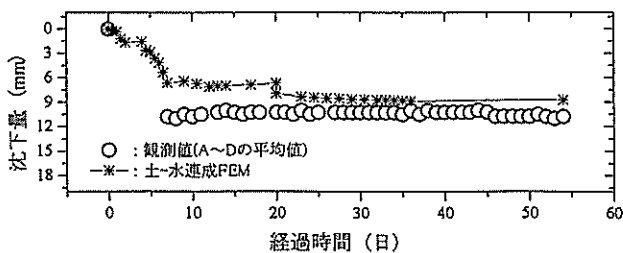


Fig.11 時間沈下関係
Time-settlement behavior of the ground

が観測値を下回っており、20 日目以降の解析値と観測値は良く一致した。これは、土質試験値が十分に得られていないこと、特に地下水位以上の圧密試験値がなく、地下水位以下の試験値を外挿して求めたことが原因であると考えられる。

このように、多少の予測誤差はあるものの、土-水連成 FEM は、概ね精度良く予測できることを確認した。

4. 粒子フィルタによる地盤挙動のデータ同化

前章では、近接施工時の地盤の変形挙動評価における土-水連成 FEM の有効性について、実観測値を用いて示した。しかしながら、Fig.11 において掘削開始から 20 日目までの間は実測値と解析結果の間に誤差が認められた。このような誤差を検証しないまま施工することは、リスクを内包したまま近接施工を行うことを意味する。本章では、データ同化を適用することで、予測精度を向上させるとともに、逐次同定で得られる確率分布に着目し、リスク評価を試みる。これにより、観測施工による施工法の変更や、隣接工区設計の予測精度向上といった PDCA サイクルが実現する。

4.1 データ同化の概要

データ同化は、主として地球科学の分野で用いられてきた用語である。地球科学に限らず、事象の予測に数値シミュレーションが用いられるが、地盤工学においては有限要素モデルによる数値計算がこれに相当する。こうしたモデルにおいて、初期/境界条件やパラメータの設定が不確かとなることがあり、予測と現象が一致しないことはしばしばである。そこで、事象に関する観測値を用いて、数値シミュレーションモデルの条件やパラメータを補正することで、予測精度の向上を図ることを「データ同化」と呼ぶ (中村ら, 2005)。

データ同化には種々の手法が提案されているが、本研究では、非線形・非ガウス性の問題に対し、容易に適用可能な粒子フィルタ (Particle Filter, Gordon et al., 1993; Kitagawa, 1996; 樋口, 2005) に着目し、その適用性を検討する。

4.2 粒子フィルタ

粒子フィルタ (以下、「PF」と呼ぶ) は、状態変数の確率密度関数を「粒子」と呼ばれる多数の離散サンプルで近似する時間更新アルゴリズムを有する。PF の特長として、1) 強非線形問題、2) 非ガウス性の確率分布、3) 弾塑性モデルの挙動において重要となる応力履歴を考慮したパラメータ同定、のそれぞれに適用可能であることをあげる。また、確率分布を離散サンプルで近似するため、任意の確率分布を表現できることに加え、複雑な積分計算を、簡単な和の計算として処理できる。最近では、その地盤解析への適用性が検討されている (村上ら, 2009; Murakami et al., 2012; 珠玖ら, 2010, 2011; Shuku et al., 2012)。ここでは、PF の詳細については割愛し、具体的な方法やアルゴリズムは付録に示す。

4.3 近接施工問題への適用

前章で示した開削工事のモデルに対して PF を用いたデータ同化を行い、その有効性について検証する。具体的には、以下の手順による。

- (1) PF によるパラメータの同定
- (2) 同定パラメータを用いた解析の実施
- (3) (2)で得られた解析結果と実測値の比較

同定パラメータとして、土質試験値が欠測していた地下水位以浅の地盤定数に着目した。地下水位以浅の Ac1 層は、地下水位以深の同層に比べ過圧密度が進行しているものと考えられる。東・高山 (1993) が過圧密粘土のパラメータを推定したのを参考に、本文では過圧密比 OCR と非可逆比 Λ を同定パラメータとした。地盤定数のバラツキを表すため、各パラメータの一樣乱数を Table 2 に示す範囲で発生させた。乱数の発生範囲は、Iizuka and Ohta(1987), 安原 (1982), 福井ら (2006) の報告を参考に設定した。用いる粒子が多ければ多いほど同定精度は向上するが、計算コストも粒子数に比例して増大する。珠玖ら (2010) は、PF を実地盤挙動へ適用し、Cam-clay パラメータ 2 つに対して 200 個の粒子を用いた同定を実施しており、精度の高い同定パラメータが得られたと報告している。これらを踏まえ、粒子数 (S_n) は 200 個と設定し、2 つのパラメータは無相関と仮定した。Fig.12 に同定対象とした地下水位以浅の構成パラメータ決定手順を示す。二重丸で囲んだパラメータが同定対象である。図中の変数及び算定式は Fig.8 と共通である。

観測値として、背面地盤の沈下量を用いてデータ同化を行った。背面地盤の沈下量には、観測点 A~D 点の平均値を用いた。データ同化による同定パラメータの経時変化を Fig.13 に示す。本文で示す「同定パラメータ」とは、粒子の重み付き平均値を意味し、次式により算出される。

$$\bar{\xi}_i = \sum_{l=1}^{S_n} \tilde{w}_i^{(l)} \xi_i^{(l)} \quad (1)$$

ここに、 $\bar{\xi}_i$ は同定パラメータを表し、 $\xi_i^{(l)}$ は粒子番号 (l) のパラメータの値、 $\tilde{w}_i^{(l)}$ は重みを表す。 S_n は PF に用いた粒子数を表す。

式(A3)から明らかのように、同定パラメータの値は、解析結果と観測値だけでなく、観測誤差分散行列 R_t にも大きく影響される。この観測誤差分散行列は、時間によって変化するものと仮定し、解析ステップごとに、実観測値 (Fig.4, 10 の A, B, C, D 点) の分散値を適用した。しかしながら、実際の工事現場において、データ同化に適した理想的な観測値が得られる例は少なく、欠損データの補完や実観測値のスムージングを行わなければならないケースも多々ある。本文で用いた観測値は、ある程度連続的に得られているものの、情報量の多い掘削時の観測値に欠損が見られた。精度の高いパラメータ同定を行うために、統計的に根拠のある補完値を使う必要があると考え、観測値を時間軸方向についてスムージングした。具体的には、観測値を多次元関数で近似することを考え、その次数を赤池情報量規準 (Akaike, 1974) により決定した。また、観測誤差分散行列

については、上記の観測値を用いてデータ同化を行う場合、観測値が得られていない期間について、何か仮定値を用いる必要がある。ここでは、Monte Carlo Simulation (以下、「MCS」と呼ぶ) から得られる最終沈下量の分散値を用いた。

同定パラメータは、両方とも施工初期に値が大きく変動し、最終的に OCR=14.92, $\Lambda=0.632$ という結果を得た。 Λ は 10 日目以降ほぼ一定の値に収束したが、OCR は収束したとはいえなかった。これは、沈下に対する Λ の感度が OCR のそれに比して高いことや、本問題について OCR に解の一意性がない場合もありうる事が理由としてあげら

Table 2 粒子生成範囲
Range of particle generation

パラメータ	範囲
過圧密比 OCR	$6 \leq OCR \leq 20$
非可逆比 Λ	$0.6 \leq \Lambda \leq 0.9$

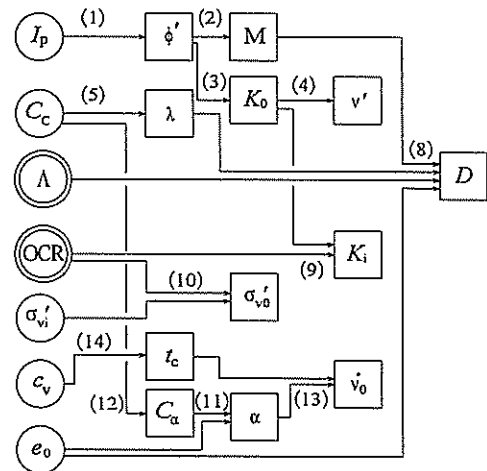


Fig.12 地下水位以浅の構成パラメータ決定手順
Determination of constitutive parameters of soil deposit over water table

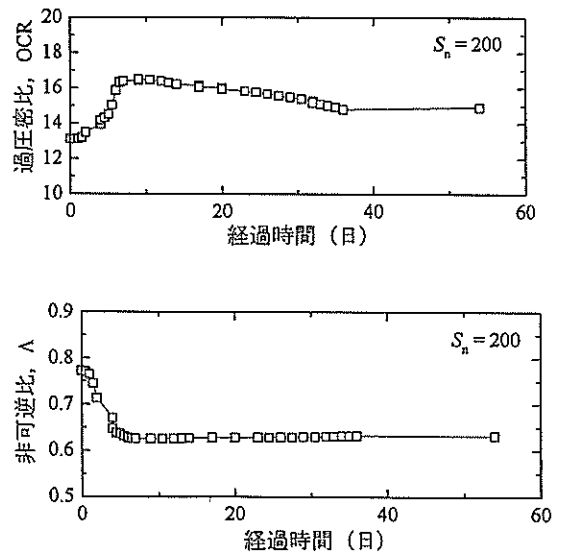


Fig.13 同定パラメータの経時変化
Time evolution of the identified parameters

れる。また、OCR は降伏曲面の大きさを規定するものであるため、OCR が異なる値であったとしても、応力状態が弾性領域内であれば、両者は同じ挙動を示す。このことから、OCR は必ずしも一意に決まらない可能性が示唆された。

当初設定より大きな OCR が同定されたことから、土留め壁に作用する側圧強度を過小に評価したことがわかる。また、当初より小さな λ が同定されたことから、 κ を過小に（体積弾性係数 K を過大に）評価したために、土留め壁変位に伴う沈下を過小評価したことがわかる。

同定パラメータを用いた解析結果を Fig.14 に示す。Fig.14 は、0 日目 (MCS)、2 日目及び 54 日目（最終段階）までのデータを用いて同定したパラメータによる解析値と観測値を対比したものである。同定パラメータを用いた解析結果は、観測値を得ることで実測値とよい対応を示しており、Fig.11 で認められた施工初期の観測値と計算結果の不一致は解消されていることがわかる。観測値の仮定値が精度の高いパラメータ同定にとって悪影響を及ぼすことが懸念された。しかし、同定パラメータを用いた再計算結果から、スムージングを行ったデータを用いても観測値を再現するパラメータが得られた。この結果は、観測値を用いた PF を適用することで、近接施工における地盤変状の逐次同定精度が向上する可能性を示唆した。

5. 影響評価への応用（リスク額の算定）

前章では、近接施工時の地盤の変形挙動予測手法について考察し、土-水連成 FEM 及び PF の有効性を示した。本章では、地盤挙動の予測段階で適用した PF の特長に着目し、リスクの定量的評価への応用について考察する。

5.1 設計段階のリスク評価

PF のもつ「①状態変数の任意の確率分布を評価できる」、
「②観測値に基づいて分布は更新される」という特長を活用した、リスク評価への応用方法を示す。

PF は、観測値が得られる前の段階で、粒子を用いて計算を実施する。これは一般にいう MCS に相当する。Table 2 のパラメータによる MCS で得られた最終沈下量の頻度分布を Fig.15 に示す。このような変位の確率分布が得られれば、次式により設計段階のリスク額を計算することができる。

$$R(S_0) = \sum_{i=1}^{S_0} P_i C_i \quad (2)$$

$$P_i = \tilde{w}_0^{(i)} \quad (3)$$

ここに、 $R(S_0)$: リスク額、 C_i : 被害額、 P_i : 被害の生起確率。

P_i は PF における重み $\tilde{w}_0^{(i)}$ に対応し、観測値の影響を受けていない事前設計段階では、 $\tilde{w}_0^{(i)} = 1/S_0$ 、観測値が得られれば PF により更新された値を用いる。

一方、被害額は、Fig.16 の沈下量と補償費の関係から予

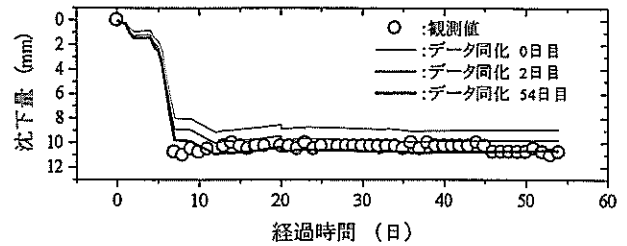


Fig.14 同定パラメータを用いた解析結果
Numerical simulation results using identified parameters

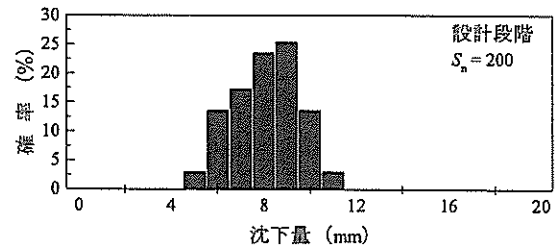


Fig.15 設計段階における最終沈下量のヒストグラム
Histogram of settlement at the completion

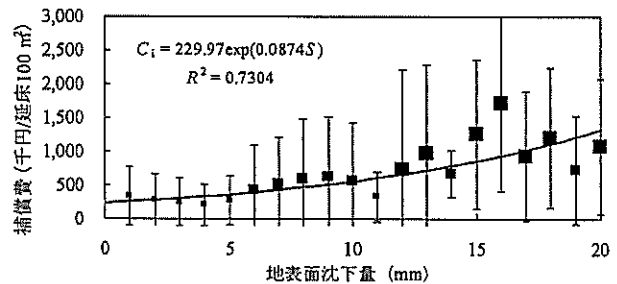


Fig.16 地表面沈下量と建物の補償費 (若林ら, 2010)
Relations of compensation costs for settlement and buildings (Wakabayashi et al., 2010)

Table 3 サンプルの概要
Summary of samples

区分		サンプル数
対象工事数		59 件
建物の棟数	木造	178 棟
	鉄骨造	79 棟
	鉄筋コンクリート造	28 棟
	コンクリートブロック造	14 棟

Table 4 イベントの種類
Different events

Event	工種	予測沈下量	リスク額	対策費
E-1	原案	10.8 mm	491 千円	—
E-2	矢板Ⅲ型 →Ⅳ型	8.4 mm	479 千円	8,920 千円
E-3	地盤改良	3.9 mm	323 千円	14,040 千円

測することができる (若林ら, 2010). Fig.16 は, Table 3 のサンプルを対象に地表面沈下量と建物の補償費のデータを整理した移動平均グラフである. 移動平均値は, 地表面沈下量が ± 1 mm となる区間の補償費平均値である. 誤差範囲は標準偏差を示す. Fig.16 を基に設定した被害額の予測式 (回帰式) を以下に示す.

$$C_i = 229.97 \exp(0.0874S) \quad (4)$$

ここで, S は沈下量 (mm) を表し, C_i は被害額 (千円/延床 100 m^2) を示す. Fig.16 中の R^2 は, 回帰式の決定係数である. ここでは, 沈下量と被害額に指数関係を仮定したが, 種々の関数形を仮定できることに注意されたい.

上記の関係式を用いて求めた, PF の観測値が得られる前のリスク額 $P_i C_i$ (Fig.15 に対応するリスク額) は, 491 千円となった (以下に示すリスク額の単位は, 延床 100 m^2 当たり). 実務への適用に際しては, 数パターンのイベント (設計代替案) に対してリスク評価を行い, その中から最適案を決定することができる.

イベント (設計代替案) のリスク評価例を Table 4 に示す. E-1 は, Fig.3 に示す原案である. E-2 は, 鋼矢板規格を III 型から IV 型に変更し壁体の剛性を高める案である. E-3 は, 掘削底面以下を高圧噴射攪拌工法で地盤改良する案であり, 鋼矢板規格は E-1 と同じ III 型である. また, 対策費は, 原案 (E-1) に対する差額である.

ここで, 許容リスク額を 500 千円とした場合, E-1 が最適案となる. ただし, 最適案を採用した場合において, 観測施工によりリスク超過の判定がなされることを想定して, この段階で代替案を準備することが望ましい.

5.2 施工段階の影響評価

施工時には観測値を得ることで, 被害量 (沈下量) の確率分布が更新される. Fig.17 は最終沈下量に対する確率分布の経時変化を示す. 観測値を得ることで PF により同定パラメータの確率分布が更新され, それにより解析値 (最終沈下量) に対する確率分布も更新される.

設計時に MCS に基づくリスク額の計算を行ったが, 観測値を得ることによって, 変位の確率分布が更新されるため, リスク額も更新される. Fig.18 は掘削開始から施工完了までのリスク額の経時変化を表したものである. 設計時のリスク額は, 491 千円と評価されていたにもかかわらず, 観測値を得ることで, リスク額は変動し, 54 日目には 597 千円となった.

このように, 施工時の観測値で被害量 (沈下量) とリスク額が更新される. このリスク額の増減を確認することで, 施工方法変更の意思決定が可能となる. 前述のイベント例では, 許容リスク額を 500 千円と設定していたが, 施工開始直後に, 許容リスク額を上回る事が予測された. この時の対応策を考えた場合, 掘削途中であるから鋼矢板型式の変更はできないので, E-2 は不適である. よって, 変更案としては, E-3 の地盤改良が最適である. 一次掘削段階でリスク評価を行えば, E-3 への速やかな変更が可能とな

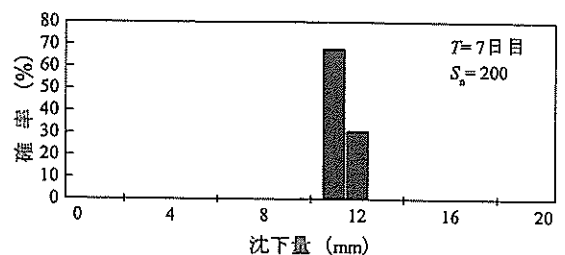
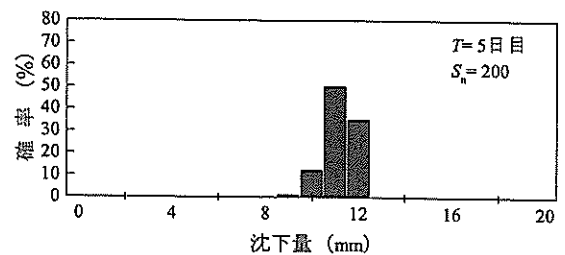
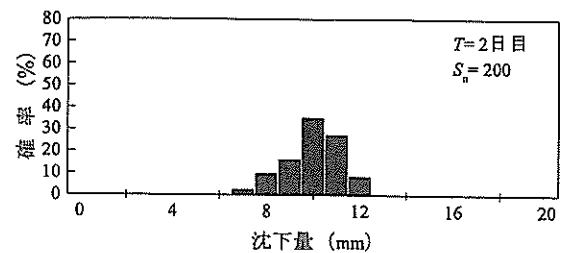


Fig.17 確率分布の経時変化
Probability density functions for settlement

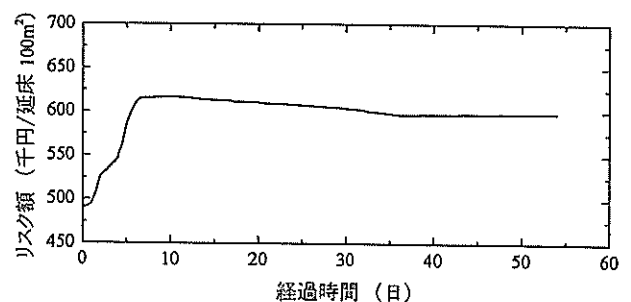


Fig.18 リスク額の経時変化
Time evolution of risk cost

る。

ここで示したように, データ同化によるリスク評価は, 観測施工の有効な意思決定手段になる. また, 水路工事のように延長の長い工事においては, データ同化で得られた物性値を隣接工区的设计に反映させることで, 予測精度が向上する. このように, 施工データを設計にフィードバックする PDCA サイクルが確立されれば, コスト削減などの事情で制限される調査不足を補うことができる.

これまでの考察により, PF を用いたデータ同化により, 近接施工時の定量的なリスク評価 (地盤挙動の評価) を実現した. 最後に, 新たに提案する近接施工のフローを Fig.19 に示す. このフローにおいて, 事前調査では, 家屋調査や地質調査を行う. 地質調査では, 標準貫入試験や孔内水平

載荷試験などの原位置試験に加え、粘性土地盤では、三軸圧縮試験・圧密試験を行う必要がある。有限要素解析は、砂・砂礫地盤は弾性解析を、粘性土地盤は土-水連成弾塑性解析を行うことが望ましい。そして、近接施工の工事記録を次工事の設計にフィードバックすることが肝要である。なお、土留め工の設計を有限要素法で一体的に行うことも可能であると考えられる。しかし、本研究現場では、土留め壁の変位計測が行われていなかったため、逐次解析法・土-水連成 FEM による土留め壁の変位量予測精度を評価できなかった。

6. 結論

本研究では、近接施工の管理基準値としてリスクに着目し、新たな影響評価手法の構築を試みた。はじめに、近接施工に伴う地盤挙動の予測手法として、弾塑性構成モデルを用いた土-水連成 FEM に着目し、その有効性について実観測値を用いて実証した。その後、データ同化に基づいた近接施工における地盤の変形挙動評価、及びリスク評価への適用性について考察した。得られた結論を以下に列挙する。

- 1) 弾塑性モデルを用いた土-水連成解析は、開削工事の変形挙動評価に有効である。
- 2) PF を用いたデータ同化により、土-水連成 FEM に適用する物性値を同定することで、開削工事の変形挙動予測精度が向上する。
- 3) データ同化の応用により、施工過程で逐次リスク評価が行える。それによって適切な施工法への変更が可能となる。

今後は、設計の実務に適用可能な、少ないパラメータで簡易に予測できる手法、調査・設計・施工段階で遭遇するあらゆる不確実性を考慮した意思決定手法を提案したいと考えている。

謝辞：末筆ながら、神戸大学 飯塚 教授ならびに東京工業大学 竹山 智英 助教には土-水連成 FEM のデータ設定にご助言を賜った。中国四国農政局 四国東部農地防災事務所の皆様には近接施工のデータを提供して頂いた。また、本研究は科学研究費（挑戦的萌芽研究「統計数理手法を用いた汎用的逆解析システムの開発：性能設計/維持管理への応用」（代表：村上 章）No.23656297）の援助を得た。記して深謝の意を表します。

付録 PF のアルゴリズム (珠玖ら, 2010)

ここでは、PF の離散サンプルによる確率分布の近似概念と具体的なアルゴリズム (Fig.A1) を示す。

はじめに、次の一般状態空間モデルを考える。

$$\begin{aligned} x_t &= F_t(x_{t-1}) + v_t \\ y_t &= H_t(x_t) + w_t \end{aligned} \tag{A1}$$

ここに、ベクトル x_t, y_t はそれぞれ離散時間 $t = 1, \dots, T$ におけるシ

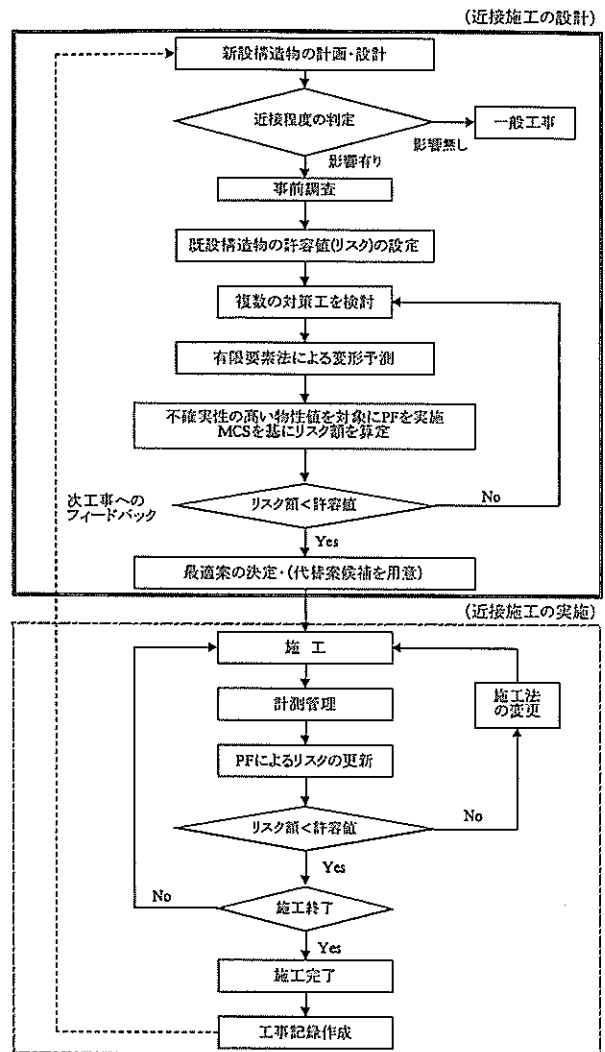


Fig.19 近接施工のフロー Flowchart of neighboring work

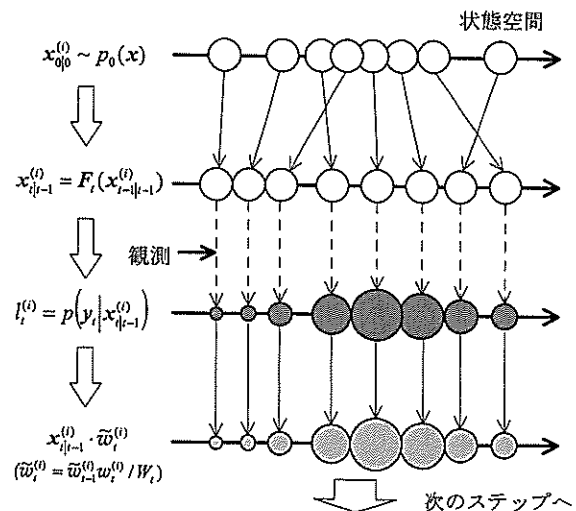


Fig.A1 PF のアルゴリズム (樋口, 2005) Algorithm of PF (Higuchi, 2005)

システムの状態と観測値を示し、ベクトル v_t と w_t は、システムノイズ、観測ノイズを示す。 F_t は一般に時間 $t-1$ から t までの非線形状態遷移関数を表し、本研究では土-水連成 FEM により表される。 H_t は観測値と状態変数の関係が線形であれば 1 または 0 から成る行列、非線形であれば関数を表す。地盤解析においては、状態ベクトル x_t は変位や間隙水圧ならびに未知数となるパラメータを示し、 y_t は観測される変位や間隙水圧を示す。

PF において、状態 x_t の確率密度関数は粒子から成る実現値集合によって近似される。具体的に地盤解析における粒子は、解析に必要な地盤定数、及びその定数を用いて得られた解析結果、変形や間隙水圧を意味する。例えば、時刻 $t = t-1$ におけるフィルタ分布 $p(x_{t-1}|y_{t-1})$ は、実現値集合 $\{x_{t-1}^{(1)}, x_{t-1}^{(2)}, \dots, x_{t-1}^{(S_n)}\}$ により (上添字 (i) は粒子番号を表し、 S_n は全粒子数を表す。また、下添字 $t-1|t-1$ の左側は現時刻、右側は使用した観測の最後の時刻を表す)。

$$p(x_{t-1}|y_{t-1}) \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{S_n} \delta(x_{t-1} - x_{t-1}^{(i)}) \quad (A2)$$

と近似される。ここに δ は Dirac のデルタ関数を表し、 S_n は粒子数を表す。 $p(x_{t-1}|y_{t-1})$ は y_{t-1} が生じた下で x_{t-1} の生じる確率 (条件付き確率) を表す。ただし、 y_{t-1} は $(y_1, y_2, \dots, y_{t-1})$ を意味する。状態 x_t の確率密度関数は、以下のアルゴリズムに従って、逐次的に更新される：

- (1) $i=1, \dots, S_n$ について確率分布 $p_0(x)$ に従う k 次元の乱数 $x_{t=0}^{(i)}$ を生成する。 $p_0(x)$ は、 x の時刻 $t=0$ における初期確率分布を表す。また、 $\bar{w}_0^{(i)} = 1/S_n$ とする。
- (2) $t=1, \dots, S_n$ について以下に示す (a) ~ (c) のステップを実行する。
 - (a) 各 i ($i=1, \dots, S_n$) について i, ii を実行する。
 - i. $x_{t-1}^{(i)} = F_t(x_{t-1}^{(i)})$ を計算する。
 - ii. $I_t^{(i)} = p(y_t|x_{t-1}^{(i)})$ を計算する。 $p(y_t|x_{t-1}^{(i)})$ は $x_{t-1}^{(i)}$ が与えられた時の観測値 y_t の条件付き確率分布を表す。
 - (b) $W_t = \sum_{i=1}^{S_n} \bar{w}_{t-1}^{(i)} I_t^{(i)}$ を計算する。
 - (c) $\bar{w}_t^{(i)} = \bar{w}_{t-1}^{(i)} I_t^{(i)} / W_t$ を計算し、 $x_{t-1}^{(i)}$ を求める ($x_{t-1}^{(i)}$ は時刻 t までの観測値を使用した時の i 番目の実現値、すなわち、フィルタ分布の実現値を表す。また、 $\bar{w}_t^{(i)}$ を時刻 t における $x_{t-1}^{(i)}$ の重みと呼ぶ)。

上記の (2) (a) ii の $I_t^{(i)}$ は、 $x_{t-1}^{(i)}$ の観測値 y_t への当てはまりの程度 (尤もらしさ) を表し、尤度と呼ばれる。例えば、式 (1) の観測ノイズ w_t が観測誤差共分散 R_t の正規分布に従うと仮定するならば、粒子 $x_{t-1}^{(i)}$ の尤度は次式によって算定される。

$$p(y_t|x_{t-1}^{(i)}) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^m |R_t|}} \exp \left[-\frac{(y_t - H(x_{t-1}^{(i)}))^T R_t^{-1} (y_t - H(x_{t-1}^{(i)}))}{2} \right] \quad (A3)$$

ここで上付きの m は次元数を表す。ここに、 R_t は観測誤差分散行列を表す。

引用文献

Akaike, H. (1974) : A new look at the statistical model identification, *IEEE Trans. Automat. Contr.*, 19, 716-723.

Alpan, I. (1967) : The empirical evaluation of the coefficient K_0, K_{0r} , *Soils and Foundations*, 7(1), 31-40.

青木雅路, 河野貴穂, 北折秀規 (2000) : 実測山留め壁変位に基づく背面沈下の検討方法の比較 (その 1) (その 2), 日本建築学会大会講演梗概集, 537-540.

青木雅路, 佐藤英二, 丸岡正夫, 甲野裕之 (1990) : 根切りに伴う周辺地盤の挙動, 第 25 回土質工学研究発表会講演概要集, 1509-1512.

地下水ハンドブック編集委員会 (1979) : 地下水ハンドブック, 建設産業調査会, 291-292.

中国四国農政局四国東部農地防災事務所 (2010) : 仮設構造物設計・施工の手引き.

福井克典, 東 孝寛, 大坪政美, 金山泰平, 古田良幸, 平 尚矩 (2006) : 有明粘土 (横島試料) の Hvorslev の強度定数と非可逆比 A , 平成 18 年度農業土木学会大会講演会講演要旨集, 834-835.

Gordon, N.J., Salmond, D.J. and Smith, A.F.M. (1993) : Novel approach to nonlinear/non-Gaussian Bayesian state estimation, *IEE Proceedings F*, 140, 107-113.

東 孝寛, 高山昌照 (1993) : 有明粘土の非可逆比 A の一推定法, 第 74 回農業土木学会九州支部講演会講演集, 235-236.

樋口知之 (2005) : 粒子フィルタ, 電子情報通信学会誌, 88(12), 989-994.

本多 隆 (1998) : 山留め FEM 解析におけるジョイント要素の入力データ設定方法, 土と基礎, 46(1), 39-404.

Iizuka, A. and Ohta, H. (1987) : A Determination procedure of input parameters in elasto-viscoplastic finite element analysis, *Soils and Foundations*, 27(3), 71-87.

Jáky, J. (1944) : The coefficient of earth pressure at rest, *Journal of the Society of Hungarian Architects and Engineers*, 355-388.

地盤工学会近接施工編集委員会 (2010) : 近接施工, 地盤工学会, 50-51.

Kenney, T.C. (1959) : Discussion on Proc. Paper 1732 (Wu, 1958), *JSMFED, Proc. ASCE*, 85(3), 67-79.

建設省土木研究所 (1983) : 近接施工設計施工要領 (案), 10-12.

Kitagawa, G. (1996) : Monte Carlo filter and smoother for non-Gaussian nonlinear state space models, *Journal of Computational and Graphical Statistics*, 5, 1-25.

小島謙一, 太田秀樹, 館山 勝, 飯塚 敦 (2000) : 掘削工事における周辺地盤の簡易沈下予測手法, 土木学会論文集, (652), 217-227.

丸岡正夫, 幾田悠康 (1986) : 沖積地盤での根切りに伴う周辺沈下, 第 21 回土質工学研究発表会講演概要集, 1369-1370.

村上 章, 西村伸一, 藤澤和謙, 中村和幸, 樋口知之 (2009) : 粒子フィルタによる地盤解析のデータ同化, 応用力学論文集, 12, 99-105.

Murakami, A., Shuku, T., Nishimura, S., Fujisawa, K. and Nakamura, K. (2012) : Data assimilation using the particle filter for identifying the elasto-plastic material properties of geomaterials, *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.*, DOI: 10.1002/nag.2125.

中村和幸, 上野玄太, 樋口知之 (2005) : データ同化 : その概念とアルゴリズム, 統計数理, 53(2), 211-229.

- 日本道路協会 (1999) : 道路土工 仮設構造物工指針, 94-108.
- 日本建築学会 (2002) : 山留め設計施工指針, 228-234.
- Ohta, H. (1972) : *Analysis of deformation of soils based on the theory of plasticity and its application to embankments*, Doctoral Dissertation, Kyoto University.
- Peck, R.B. (1969) : Deep Excavation and Tunneling in Soft Ground, *Proc. of 7th ICSMFE, State of the Art Report*, 1, 225-290.
- Roscoe, K.H. (1970) : The influence of strains in soil mechanics, *Géotechnique*, 20(2), 129-170.
- Sekiguchi, H. and Ohta, H. (1977) : Induced anisotropy and time dependency in clays, *Proc. Specialty Session 9, 9th ICSMFE*, 229-239.
- 珠玖隆行, 村上 章, 西村伸一, 藤澤和謙, 中村和幸 (2010) : 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.
- 珠玖隆行, 西村伸一, 村上 章, 西村有希, 藤澤和謙 (2011) : データ同化に基づいた信頼性解析法による土構造物の性能照査, 地盤工学ジャーナル, 6(3), 415-426.
- Shuku, T., Murakami, A., Nishimura, S., Fujisawa, K. and Nakamura, K. (2012) : Data assimilation for experimental behavior of soil deposit by the particle filter, *Soils and Foundations*, 52(2), 279-298.
- 杉本隆男 (1986) : 開削工事に伴う地表面最大沈下量の予測に関する研究, 土木学会論文集, (373), 113-120.
- 杉本隆男, 佐々木俊平 (1987) : 土留め壁の変形と地表面沈下量の関係, 第22回土質工学研究発表会講演概要集, 1261-1262.
- 若林 孝, 永木隆介, 浅井 敏, 二越文彦, 村岡 聡, 田口清隆 (2010) : 吉野川下流域地区における近接施工の意思決定手法, 第65回農業農村工学会中国四国支部講演会講演要旨集, 94-96.
- 若林 孝, 永木隆介 (2011) : 近接施工の意思決定手法, 農業農村工学会誌, 79 (10), 44-45.
- 安原一哉 (1982) : 過圧密比, 土と基礎, 30(3), 61-62.
- (2012. 3. 20. 受稿, 2012. 7. 20. 閲読了)
- [この研究論文に対する公開の質疑あるいは討議(4,000字以内, 農業農村工学会論文集企画・編集委員会あて)は, 2013年4月24日まで受付けます.]

Risk Evaluation in Neighboring Work Using Data Assimilation

WAKABAYASHI Takashi*, MURAKAMI Akira** and SHUKU Takayuki***

* *Nikka Engineering, Co., Ltd.*, 517-2 Nishiichi, Minami-ku, Okayama 700-0953, JAPAN

** *Graduate School of Agriculture, Kyoto University*, Kitashirakawa-oiwakecho, Sakyo-ku, Kyoto 606-8502, JAPAN

*** *Graduate School of Environmental and Life Science, Okayama University*, 3-1-1 Tsushimanaka, Kita-ku, Okayama 700-8530, JAPAN

Abstract

This paper presents the parameter identification of an elasto-plastic constitutive model for geomaterials and a risk evaluation for neighboring work based on a data assimilation using the particle filter (PF) and incorporating a soil-water coupled finite element analysis with an elasto-plastic model. After the numerical implementation of input data for the soil-water coupled FEM is examined, based on an in situ investigation, its applicability to an actual excavation work is discussed. A risk assessment for an alternative design, using the probability density which the PF computes and updates on the basis of observations, is also proposed. It is revealed that, for a practical example, the FEM results using the parameters identified by PF show a good agreement with the observations and that a quantitative and reliable risk evaluation can be achieved using the proposed method.

Key words : Neighboring work, Data assimilation, Decision making, Risk evaluation, Soil-water coupled analysis, Elasto-plastic finite element analysis, Particle filter