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

珠玖 隆行¹, 西村 伸一¹, 村上 章², 西村 有希¹, 藤澤 和謙¹

1 岡山大学大学院・環境学研究科

2 京都大学大学院・農学研究科

概 要

国内の社会基盤施設の設計法は、これまで大量の社会資本を供給してきた仕様設計体系から信頼性設計を 基本とした性能規定型の設計体系に移行しつつある。その一方で、盛土や堤防などの土構造物に対する信 頼性・性能設計は、設計手法・計算モデルの予測精度の低さや地盤パラメータの不確定性に起因する種々 の問題を有している。本研究では、土構造物の性能照査に適用可能な信頼性設計手法を新たに提案し、そ の有効性について、軟弱粘性土地盤上に築造される盛土の残留沈下問題に適用することにより検証した。 提案手法は、設計段階から構造物施工完了までの全工程を設計とみなし、設計段階で最適と判断された設 計に対して観測データにより積極的に再検討を行う「情報化施工」のコンセプトに基づいている。具体的 な土構造物の性能照査手法として、弾粘塑性モデルを用いた土/水連成有限要素解析を用い、モンテカルロ シミュレーションを用いて地盤の不確定性を評価した。さらに、粒子フィルタによるデータ同化結果に基 づいて、観測施工段階における変位の予測分布の更新、および性能照査や追加対策工の検討を行った。そ の結果、提案手法は明示的・定量的な性能照査にも十分適用可能であり、土構造物の性能設計において有 力なツールとなり得ることが示された。

キーワード:信頼性設計,性能照査,LCC,データ同化,粒子フィルタ

1. はじめに

1995年のWTO (World Trade Organization) による TBT (Technical Barriers to Trade)協定を受けて、国内の社会基 盤施設の設計法は、これまで大量の社会資本を安定して供 給してきた仕様設計体系から、信頼性設計を基本とした性 能規定型に移行しつつある。このような流れは、設計指針 の国際標準化への対応、すなわち国際的な技術規準との整 合性を図ることだけでなく、今後限られた条件下でより合 理的に構造物を設計するために、構造物が備えるべき機能 および性能を LCC (Life Cycle Cost) などの指標により直 接的に評価できる性能設計体系が適しているという期待 がある。

盛土や堤防,フィルダムなどの土構造物においても例外 ではなく,仕様設計から性能設計に移行しつつある。例え ば,2004年に地盤工学会で基準化された「性能設計概念 に基づいた基礎構造物等の設計原則(地盤コード 21)」¹⁾ において,一般的な基礎構造物のみならず,盛土や切土の 性能設計に関する基準を制定する試みが始まっている。

このような流れを受けて、土構造物の性能設計に関連した研究がこれまで多数実施されている。例えば、高橋ら²⁾

は,道央自動車道の軟弱地盤における高速道路盛土工事に 対して LCC の試算を行い,当時の設計方針の妥当性につ いて検証した。竜田ら³⁾,稲垣ら⁴⁾,川井ら⁵⁾は,軟弱地 盤上の盛土工事を対象に,関ロ・太田の弾粘塑性モデルを 用いた土/水連成解析 (DACSAR)⁶⁾の結果に基づき,LCC の算出や最適な軟弱地盤対策工法の抽出を試みた。

土構造物の性能設計について議論され、多くの成果があ げられているものの、依然として照査手法の精度に大きな 課題が残されている。土構造物で扱う地盤材料は、不均質 な材料であり、その力学特性は土骨格と間隙水の相互作用 によって大きく変化する。このような材料から成る土構造 物の性能を照査する場合、荷重に対する変位などの応答を 正確に表現できるシミュレーションモデルを用いた数値 解析に基づく必要がある。しかしながら、近年の精緻なシ ミュレーションモデルを用いたとしても、実地盤の挙動を 正確に把握することは困難であり、いわゆる Type-A 予測 の困難さは、これまで実施されてきた多くの試験盛土によって明らかにされた⁷⁰。また、解析に用いる地盤定数の設 定には高度な技術的判断が要求され、その判断によって結 果が大きくばらつくことが知られており、安定して信頼性 の高い解を得るためには未だ多くの課題が残されている。 このような予測に伴う種々の不確定性に対処するため, 観測データを設計・施工にフィードバックする観測施工が 提案され,地盤工学における種々の問題に適用されている。 とくに,土構造物に対する観測施工・信頼性設計の先駆的 な研究として,松尾・浅岡らの一連の業績⁸⁾を挙げること ができる。彼らは,構造物の施工中であっても,観測デー タに基づいて積極的に設計変更を行う信頼性設計法を動 学的設計法と名付け,提案手法を軟弱地盤上への盛土,斜 面安定,粘性土地盤の沈下予測へ適用した。また,Asaoka⁹⁾ は,浅岡法のパラメータ更新にベイズの定理を利用し,圧 密沈下の予測解析を行った。この方法により,将来的な沈 下量の予測確率分布が示され,沈下問題に対する信頼性設 計の枠組みが提供された。最近の信頼性設計における観測 施工の適用例としては Gilbert ら¹⁰⁾や Cheung and Tang¹¹⁾の 研究が挙げられる。

本研究では、これまでの研究成果を踏まえ、土構造物の 性能設計に適用可能な、観測施工に基づいた信頼性設計手 法を新たに提案し、その適用性について、軟弱地盤上への 盛土建設問題を対象とした数値実験により検証する。土構 造物および基礎地盤の変形挙動、とくに残留沈下に着目し、 その予測に適用可能なツールとして弾粘塑性モデルを用 いた土/水連成有限要素法⁶⁰を用いる。また、解析に必要と なる地盤定数の不確定性(ばらつき)をモンテカルロ法に より評価する。さらに、観測施工中の性能照査や対策工要 否の意思決定、および観測データに基づいた解析結果の信 頼性更新は、粒子フィルタ¹²⁾⁻¹⁴(以下、「PF」と呼ぶ)に より行う。本論文では、数値実験に基づき提案法の概念を 説明し、性能照査法としての有効性を理論的に示す。

2. 土構造物の信頼性解析手法

本文で提案する信頼性解析手法のフローを図1に示す。 フローにおいて,設計段階と施工段階が独立した作業では なく,設計段階から構造物施工完了までの全工程を「設計」 とみなす。すなわち,松尾ら⁷⁾の提案する動学的設計法と 同様に,動態観測結果から得られる情報によって,設計段 階で最適と判断された設計に対して積極的に再検討を行 い,施工中であってもより合理的になりうるならば変更を 避けないというコンセプトを有している。

フローの各項目の詳細については 3 章で示すことから, 本章では主要な項目について述べるにとどめる。なお,以 降の説明において,図1の左側のフロー(施工開始前のフ ロー)を「事前設計段階」と呼び,対して右側のフロー(施 工開始以降のフロー)を「観測施工段階」と呼ぶ。

2.1 構造物の目的・要求性能

代表的な土構造物である道路・鉄道盛土や利水ダム・た め池の目的・要求性能としては以下のものが挙げられる。

- ・安定した支持地盤を構成する
- ・損傷による構造物内外への影響を限定的にとどめる
- ・所要の天端高さを確保できる



図1 信頼性設計法のフロー

・長期的な残留沈下によって周辺に影響を及ぼさない ただし、これらは本来、事業者などの施設管理者によって 決定される事項であり、対象構造物の目的・重要度によっ ても大きく異なる。

従来の仕様設計体系では、対象構造物が「壊れないこと」 に主眼が置かれ、その要求性能を照査する設計手法として、 安全率法や許容応力度法が用いられてきた。しかしながら 近年では、既設構造物に近接した地域に構造物が建設され る機会も多く、そのような場合には、変位に関する性能が 規定される。例えば泥炭性軟弱地盤対策マニュアル¹⁴⁾では、 盛土の許容残留沈下量の目標値を表1のように設定した。

表 1	盛土の許容残留沈下量の目標	値14)
-----	---------------	------

	Ħ.,	許容残留沈下量の 目標値	摘要
	市街地	10cm 程度	
一般盛土部	郊外地	30~50cm 程度	供用開始後
高規格盛土区間		10~30cm 程度	3年間の沈下量
橋梁等の構造物と	の接続盛土部	10~30cm 程度	

2.2 性能照查手法

都市部のような既設構造物が近接する場所に新たに盛 土や堤防などを建設する際には、構造物・基礎地盤の安定 性のみならず、既設周辺構造物への影響についても十分な 注意を払う必要がある。よって、土構造物およびその基礎 地盤の変形・変状予測に適用可能なツール(解析手法)を 用いる必要がある。 本文では、土構造物・基礎地盤の変形予測ツールとして、 関ロ・太田の弾粘塑性モデルを用いた土/水連成有限要素 解析⁶⁾を用いる。なお、土/水連成有限要素解析は、土構造 物の性能設計に対して有力なツールとなりうることが多 くの研究によって示されている²⁾⁻⁴⁾。

2.3 地盤定数の統計的性質の評価

地盤定数は、地盤が不均質性を有していることや、サン プリングから試験までの過程における乱れなどに起因し て大きくばらつくことが知られている。このような不確定 性・統計的性質を考慮した地盤定数の設定方法や、性能設 計における地盤定数の設定方法は、これまで多くの研究者 によって議論された⁸¹⁶。

提案フローでは、モンテカルロ法により地盤定数の統計 的性質に起因する解析結果のばらつきを評価する。具体的 には、地盤定数の統計的性質(平均、分散)に基づいた乱 数を準備し、その乱数を土/水連成解析における地盤定数 として用いた解析を実施する(モンテカルロシミュレーシ ョン:以下、「MCS」と呼ぶ)。なお、実務において、構造 物建設地点の基礎地盤全体を詳細に調査することや、十分 な数の土質試験結果が得られることは稀であるため、地盤 定数の統計的性質、とくに、定数の分散や共分散を知るこ とは難しい。したがって、既往の研究、経験則や実験式な どの事前情報を有効に活用することが推奨される。

2.4 LCC による設計代替案の検討

はじめに予備設計を行い、その後、性能規定を満足し、 かつ LCC の観点から経済的となりうる設計代替案を提案 し、その中から最適案を選定する。本フローでは、以下の LCC 算定式により代替案を評価する。

LCC =
$$C_i + P_m C_m$$
 (1)
ここに、 C_i は構造物の初期建設費を表し、 $P_m \ge C_m$ はそれ

ぞれ維持管理費用の生起確率,維持管理費用を表す。 C_m は残留沈下によって発生する構造物の補修コストを意味し,土構造物に対する C_m の具体的な算定式としては,例えば次式が提案されている⁴⁾。

・残留沈下量と縦断勾配補修費の関係
 C = 0.1628 1.05

$$C_{ml} = 0.1023_R = 1.03$$

・敷地境界での残留沈下量と田畑補修工事費の関係

 C_{m2} = 0.780 S_{R} - 9.22 (3) ここに, C_{m} , S_{R} はそれぞれ補修費(万円/m),対象地点に おける残留沈下量(cm)を示す。各設計代替案について LCCを算定し,その値が最小となる代替案を最適案として 採用する。

2.5 データ同化: PF による信頼度更新

観測施工段階においては,継時的に得られる観測データ を用いて,事前予測結果の信頼度を評価・更新する。具体 的には,観測結果を精度よく説明できるパラメータを PF により同定し,それらを解析にフィードバックすることで 予測の信頼度を逐次的に向上させる。 PF は状態変数の確率分布を「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し、こ れまで工学の分野で用いられてきたカルマンフィルタ (Kalman Filter)の発展版と捉えることができる。PFの特 長は、1)強非線形問題にも適用可能、2)非ガウス型の確 率分布にも適用可能、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が可能、の3 点に集約され、その地盤解析への有効性について実証され ている¹⁷⁾¹⁸⁾。

図2にPFのアルゴリズムの概略図を示す。アルゴリズムの概略図を示す。アルゴリズムの詳細やその導出過程については既往の文献¹⁹⁾を参照 されたい。

はじめに、次の非線形状態空間モデルを考える。

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_t &= \mathbf{F}_t(\mathbf{x}_{t-1}) + \mathbf{v}_t \\ \mathbf{y}_t &= \mathbf{H}_t(\mathbf{x}_t) + \mathbf{w}_t \end{aligned} \tag{4}$$

ここに、ベクトル x_{t} , y_{t} はそれぞれ離散時間 t=1,...,Tに おけるシステムの状態と観測データを示し、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、本文 では土/水連成有限要素モデルにより記述される。 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(アンサンブル)によって近似される。具体的に 地盤解析における粒子は、解析に必要となる地盤定数、お よ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 $\{x_{t-1|t-1}^{(0)}, x_{t-1|t-1}^{(2)}\}$ により (上添字(*i*)は粒子番号を表し、下添字t-1|t-1の左側は現



図2 PFのアルゴリズム

(2)

時刻,右側は使用した観測の最後の時刻を表す),

$$p(\mathbf{x}_{t-1}|\mathbf{y}_{1:t-1}) \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} \delta\left(\mathbf{x}_{t-1} - \mathbf{x}_{t-1|t-1}^{(i)}\right)$$
(5)

と近似される。ここに δ は Dirac のデルタ関数を表し、Nは粒子数を表す。 $p(\mathbf{x}_{t-1}|\mathbf{y}_{tt-1})$ は \mathbf{y}_{tt-1} が生じた下で \mathbf{x}_{t-1} の生 じる確率(条件付き確率)を表す。ただし、 \mathbf{y}_{tt-1} は ($\mathbf{y}_1, \mathbf{y}_2, \cdots, \mathbf{y}_{t-1}$)を意味する。状態 \mathbf{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:

- *i*=1 ,..., *N*について確率分布 *p*₀(*x*) に従う*d*次元の乱数*x*₀₀⁽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し,*d*は状態*x_tの次元数を表す。また, <i>w*₀⁽ⁱ⁾=1/*N*とする。
- (2) *t*=1,...,*T*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,...,*N*) について i, ii を実行する。
 - i. $\mathbf{x}_{t|t-1}^{(i)} = F_t(\mathbf{x}_{t-1|t-1}^{(i)})$ を計算する。
 - ii. $l_{t}^{(i)} = p(\mathbf{y}_{t} | \mathbf{x}_{t|t-1}^{(i)})$ を計算する。 $p(\mathbf{y}_{t} | \mathbf{x}_{t|t-1}^{(i)})$ は $\mathbf{x}_{t|t-1}^{(i)}$ が 与えられた時の観測データ \mathbf{y}_{t} の条件付き確率 分布を表す。
- (b) $W_t = \sum_{i=1}^N \widetilde{w}_{t-1}^{(i)} l_t^{(i)}$ を計算する。
- (c) $\tilde{w}_{t}^{(i)} = \tilde{w}_{t-1}^{(i)} l_{t}^{(i)} / W_{t}$ を計算し, $\mathbf{x}_{t|t}^{(i)}$ を求める ($\mathbf{x}_{t|t}^{(i)}$ は時 刻tまでの観測データを使用した時の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, $\tilde{w}_{t}^{(i)}$ を時刻tにおける $\mathbf{x}_{tt}^{(i)}$ の重みと呼ぶ)。

上記の(2)(a) ii の $l_t^{(i)}$ は、 $\mathbf{x}_t^{(i)}$ の観測データ \mathbf{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(4)の観測ノイズ \mathbf{w}_t が観測誤差共分散 \mathbf{R}_t の正規分布に 従うと仮定するならば、粒子 $\mathbf{x}_{t|t-1}^{(i)}$ の尤度は次式によって算 定される。

$$p(\mathbf{y}_{t}|\mathbf{x}_{t}^{(i)}) = \frac{1}{(\sqrt{2\pi})^{m}|\mathbf{R}_{t}|} \exp\left[-\frac{\left(\mathbf{y}_{t}-\mathbf{H}_{t}(\mathbf{x}_{t}^{(i)})\right)^{\mathrm{T}}\mathbf{R}_{t}^{-1}\left(\mathbf{y}_{t}-\mathbf{H}_{t}(\mathbf{x}_{t}^{(i)})\right)}{2}\right]^{(6)}$$

ここで上付きのmは y_t の次元数を表す。

説明の便宜上,以降の説明において,重み $\tilde{w}_{t}^{(i)}$ を信頼度 と呼ぶ。式(6)から明らかなように,解析結果の信頼度は, 解析結果と観測データのみならず,観測誤差分散行列 ($m \times m$ 行列) R_{t} の影響を受けることがわかる。

2.6 観測施工時の性能照査

構造物の施工中において逐次的に性能照査を行い,性能 規定を満たさないと判断される場合には何らかの対策を 講じる。その際,対策工の実施可否を判断するタイミング について十分な注意を払う必要がある。

観測データが得られれば得られるほど解析結果の信頼 度は向上するが、データの取得を待つ間にも構造物の施工 は進むことから,時間の経過とともに対策工の自由度が小 さく限定的なものとなる。そのため,構造物施工中の設計 変更・構造変更を許容する動学的設計法では,ある程度フ レキシブルな工程や施工計画を採用する必要がある。施工 計画を性能設計とリンクさせることにより,より合理的な 設計に繋がる。

2.7 観測施工時の対策工法

従来の仕様設計体系においては,対象構造物に対して設 計時に十分な安全率を見込むため,施工中の大幅な構造変 更や設計変更は基本的に許容されない。しかしながら,観 測施工に基づいた信頼性設計法では,施工中に得られる観 測データを有効に利用し,施工中であっても設計変更・構 造変更を積極的に検討する。先述したように,構造物施工 中に適用できる対策工法は限定的なものとなるが,変位量 低減のための対策工として,1) 鋼矢板の打設,2) 軽量盛 土工法,3)プレローディング工法(放置)などが考えられ る。施工中に実施する対策工法についても,事前設計と同 様に実現可能な対策工について検討し,LCC が最小となる 対策工を選定する。このような,逐次的な性能照査および 対策工の検討を構造物の施工完了まで実施する。

3. 軟弱地盤上の盛土を対象とした性能照査

本章では,前章で示した提案フローに従い,軟弱地盤上 に建設される盛土の残留沈下問題に対する信頼性解析を 実施し,その適用性について議論する。

3.1 対象モデル

図3に対象とした地盤モデルを示し,表2に解析に用い た地盤パラメータを示す。基礎地盤は表層に埋土層を有す る一層の軟弱粘性土地盤とし,粘性土層は関ロ・太田モデ ルにより,埋土層は線形弾性体によりモデル化を行った。 また,サンドマットおよび盛土についても線形弾性体とし てモデル化した。表3に,仮定した盛土,サンドマット, および埋土層の物性を示す。



図3 地盤モデル

表2 解析に用いたモデル地盤のパラメータ

λ	Л	М	α	ΰ ₀ (1/day)	k (m/day)
0.225	0.822	1.44	0.00503	1.0×10 ⁻⁶	6.05×10 ⁻⁴

表3 盛土,サンドマット,および埋土層の物性

	V	$\frac{E}{(\text{kN/m}^2)}$	$\frac{\gamma_{\rm s}}{({\rm kN/m}^3)}$
Sand-mat Embankment	0.333	50000	17.0
Land-fill layer	0.333	10000	17.0





解析に用いた有限要素メッシュを図4に示す。平面ひず み条件の下,盛土の対称性を考慮したモデルを採用した。 変位境界条件として,左右両端は水平変位固定とし,下端 で完全固定とした。一方,水理境界条件として,地盤表層 を排水境界とし,地盤下端および地盤の左右両端面を非排 水境界とした。

盛土の施工過程を図5に示す。盛土は多段階載荷工法を 採用し、各段階において1日10cmの盛立て速度で2m盛 立てた後、200日の放置期間を設けた。先述したように、 観測施工を行い、得られる観測データを積極的に設計にフ ィードバックするためには、自由度の高いフレキシブルな 構造や工程を採用する必要がある。そのような観点から、 本計算例においても余裕のある工程を設定した。

3.2 性能規定

対象とする土構造物の性能規定を「供用開始から 30 年 後の盛土中央地表面における残留沈下量が 100cm を超え る確率 P_{EX} を 10%以下に抑える」と設定する。数値計算に おいてこの 100cm や 10%といった境界値は,任意に設定 できる値であるが,このような定量的・明示的な性能規定 に,提案手法が十分適用可能であることを示す。

3.3 地盤定数の統計的性質の評価

モデル地盤を対象としているため、パラメータの統計的 性質を仮定し、その性質に基づいた乱数を用いることで地 盤定数のバラツキを模擬的に考慮する。性能規定から明ら かなように、ここでは土構造物の長期的な沈下挙動に着目 する必要があるため、沈下挙動への影響度が高いパラメー タとして圧縮指数 λ 、透水係数 k、二次圧密係数 α 、体積 ひずみ速度の基準値 \dot{v}_0 に関して 2500 組の乱数を割り当て る (N = 2500)。計算に使用した乱数の基本的な統計的特 性 (ここでは平均 μ と標準偏差 σ のみ)および発生範囲につ いて表 4 にまとめる。表中の Type において、N が正規乱 数、Uが一様乱数を表す。ここでは、室内試験や原位置試 験からそのパラメータの統計的性質をある程度把握でき るものについては正規乱数とし、統計的性質のみならず、 その値の設定自体が困難なパラメータについては一様乱 数として扱い、表 4 に示す範囲からその値を抽出した。

3.4 最適な設計代替案の選定

性能規定を満たす設計代替案について検討するととも に,各代替案について LCC の算定を行い,最適な対策の 選定を試みる。

3.4.1 設計代替案:サンドドレーン工法

本文では,残留沈下低減対策として,サンドドレーン工法(以下,「SD」と呼ぶ)を採用する。対策工法を SD に限定し,改良深さ H やドレーンの打設ピッチ d を変化させた計9ケースの代替案を設定し(図 6,表 5),その中か

Parameter	μ (Lower limit)	σ (Upper limit)	Туре
λ	0.225	0.034	Ν
k (m/day)	(6.05×10 ⁻⁵)	(6.05×10 ⁻³)	U
α	0.00503	0.00076	N
<i>v</i> ₀ (1/day)	(1.0×10 ⁻⁷)	(1.0×10 ⁻⁵)	U

表4 仮定した原地盤の統計的性質



	H	d	de	F(n)	$L_{\rm w}$	β	<i>k</i> *
	(m)	(m)					(m/day)
0	-	-	-	-	-	-	6.05×10^{-4}
1	30.0	2.0	2.26	1.045	0.0013	496.1	3.00×10 ⁻¹
2	15.0	2.0	2.26	1.045	0.0003	124.1	7.51×10 ⁻²
3	9.0	2.0	2.26	1.045	0.0001	44.7	2.70×10 ⁻²
4	30.0	4.0	4.52	1.696	0.0013	76.5	4.63×10 ⁻²
5	15.0	4.0	4.52	1.696	0.0003	19.1	1.16×10 ⁻²
6	9.0	4.0	4.52	1.696	0.0001	6.9	4.17×10 ⁻³
7	30.0	8.0	9.04	2.374	0.0013	13.7	8.26×10 ⁻³
8	15.0	8.0	9.04	2.374	0.0003	3.4	2.07×10 ⁻³
9	9.0	8.0	9.04	2.374	0.0001	1.2	7.44×10 ⁻⁴

表5 改良の仕様と改良地盤の透水係数

ら最適な設計・施工方法を LCC の観点に基づき選定する。 有限要素解析において,砂杭の要素や境界条件としての モデル化は行わず,改良範囲の透水係数のみを変更するこ とで表現する。なお,SD 改良地盤の透水係数 k*は,以下 に示す矢部ら²⁰⁾の提案式により評価する。

$$k^* = \frac{-8T_v H^2}{(F(n) + 0.8L_w)d_e^2 \ln(1 - U)} k = \beta k$$
⁽⁷⁾

ここに, *T_v*, *H*, *d_e*, *U* はそれぞれ時間係数, 改良深さ, 等価有効円の直径, 圧密度を示す。また, *F*(*n*)および *L_w* は Barron の等ひずみ条件下の放射状圧密理論式を規定す る関数, ウェルレジスタンス係数を表す。各ケースの条件 の詳細について表5にまとめる。*k**は SD の打設により複 雑となった地盤を一つの複合地盤とみなした,等方性を有 する「見かけの透水係数」を意味する。SD 改良地盤の透 水係数は異方性を示すものと推察されるが, 簡便な上式を 用い, SD 改良地盤の挙動を精度よく予測した事例も報告 されている²¹⁾。また,本研究では,提案した信頼性解析手 法の有効性を示すことが目的であることから,モデル化が 容易であり, かつ実地盤の挙動を表現しうる上式を採用し た。

設計代替案の MCS の際には,式(7)で算定した k*の 0.1 倍~10 倍の範囲で発生させた一様乱数により,SD 改良地 盤のばらつきを評価する。その際,沈下量挙動においては 改良域の透水係数が支配的であること,および,原地盤の 透水係数以上に,改良域の透水係数の不確定性が大きいと の観点から,改良域の統計的性質のみ考慮することとし, 未改良部分の透水係数を表2に示す透水係数kの値に固定 した。

3.4.2 設計代替案の要求性能超過確率 *P*_{EX}, LCC の算定 計 9 ケースの設計代替案について要求性能超過確率 *P*_{EX} および LCC の算定を行い,最適な代替案を選定する。

残留沈下量100cmの超過確率 P_{EX} の算定手順を以下に示す。

- 2500回のMCSの結果(2500個の粒子)について、 盛立て完了時から 30 年後の盛土中央地表面にお ける残留沈下量S⁽ⁱ⁾_{R-30}を求める。
- 2) $S_{R-30}^{(i)}$ が 100cm を超過する粒子の信頼度の総和 $\sum \widetilde{w}_{t}^{(i)}$ を計算し、その値を P_{EX} とする。

ここで、事前設計段階における信頼度は $\tilde{w}_0^{(i)} = 1/N$ となり、すべての粒子で等しい。

一方, LCC 算定式(1)は, 式(2), (3)を用いて次のように 書き換えられる。

$$\begin{aligned} \text{LCC} &= C_{i} \\ &+ L \cdot \sum_{i=1}^{N} \widetilde{w}_{i}^{(i)} \left\{ (0.162 S_{\text{R1}}^{(i)} - 1.05) + (0.780_{\text{R2}}^{(i)} - 9.22) \right\} \end{aligned} \tag{8}$$

ここで、L は盛土の補修延長(m)を表し、 $S_{R1}^{(i)}$ 、 $S_{R2}^{(i)}$ はそ れぞれ、粒子番号(i)に関する盛土中央地表面の残留沈下量 (cm)、盛土法尻の沈下量(cm)の結果を表す。初期建設費 C_i は、盛土建設費とSDによる対策費(地盤改良費)から 構成されるが、盛土施工費は各ケースで等しいと仮定し、 SD による地盤改良費のみ計上した。また盛土の施工延長 は 200m と仮定し、全区間で補修が必要となった場合を想 定して LCC を算定する。なお、算定に必要な SD の施工

表6 設計代替案のP_{EX}, LCC 算定結果

Case	C _i (million yen)	$P_{\rm m}C_{\rm m}$ (million yen)	LCC (million yen)	P _{EX} (%)
0(ORG)	0.0	168.6	168.6	94.3
1	240.8	56.2	297.1	0.0
2	105.7	77.4	183.2	0.0
3	65.2	114.5	179.7	65.7
4	60.2	75.5	135.7	5.6
5	26.4	106.1	132.6	35.2
6	16.3	142.1	158.4	97.6
7	15.0	112.0	127.1	43.4
8	6.6	148.0	154.7	92.5
9	4.0	171.6	175.7	100.0



図7 各設計代替案のLCC, C_i , $P_m C_m の関係$



図8 各設計代替案の残留沈下量の頻度分布と超過確率

費や材料費は一般的な値を用いた。

表6および図7,8に各設計代替案のLCC 算定結果およ び超過確率 PEX を示す。表および図中には、参考のため、 無対策地盤の LCC 算定結果 (ORG) も示した。表におい て, Case-6, 9の P_{EX} が ORG より大きくなるという不自然 な結果が得られているが、これは、ORG と Case-1~9 で原 地盤の透水係数の評価方法が異なること、すなわち、SD を考慮した計算(Case-1~9)は、先述した理由により原地 盤の透水係数を表2の値に固定し、 ORG では原地盤の透 水係数に統計的性質を考慮した乱数を用いたことに起因 する。よって、ORG と Case-1~9の比較により対策工の効 果を議論できないことに注意されたい。 残留沈下の分布は 各ケースで大きく異なるものの,建設時に多くの投資を行 うケースでは、維持管理費が小さくなることがわかる。-方,無対策地盤では、分布が広範囲に及ぶが、これは地盤 定数の統計的性質がそのまま反映された結果である。この ことは,詳細な地盤調査や土質試験の結果から地盤定数の 統計的性質を把握することによって,変位の分布の範囲を ある程度制限できることを示唆する。そのため、実構造物 への適用に際しては、構造物の建設費のみならず地盤調査 の費用対効果も含めた LCC の算定が推奨される。

算定の結果、Case-7 の LCC が最小値を示したが、 P_{EX} が 10%を超過した。また、その次に LCC が小さな Case-5 についても P_{EX} が性能規定を満足しない結果となった。よって、性能規定を満足し、かつ LCC が最小値となる Case-4

を最適代替案として施工を行う。

3.5 観測施工: PF による信頼度の更新

図4に示した観測計器から,観測データが継時的に得ら れるものとし, PFにより予測結果の信頼度の更新を行う。 検証は以下の手順で行った。

- 1) 表 2,5 に示した地盤定数を用いて疑似的な観測デー タを作成する。
- 疑似的な観測データに基づいたデータ同化(パラメ ータ同定)を行う。
- 2)で得られた同定パラメータを用いた解析を実施する。
- 3)で得られた解析結果と 1)で準備した疑似観測デー タを比較する。

データ同化の精度検証のために行われる数値実験では,実際の観測データを模擬するため,人工的な誤差を加えることがしばしば行われるが,本計算では簡単のため,誤差を加えない観測データを用いる。ここでは,表4に示した4つのパラメータ($\lambda, k^*, \alpha, v_0$)を同定対象とし,観測データとして図4に示したすべての観測データ(層別沈下:6点,地表面沈下:3点,間隙水圧:4点)を用いた。また,式(7)における観測誤差共分散行列 R_t は,各観測点から得られる観測データの誤差が互いに独立と仮定すると,次式により表わされる。

$$\boldsymbol{R}_{t} = (\boldsymbol{\xi} \cdot \boldsymbol{O}_{\max}^{n})^{2} \boldsymbol{I}$$
⁽⁹⁾

ここに、 ξ は誤差分散の大きさを規定する係数を表し、 O_{max}^{n} は観測データの最大値を意味する。上付きの n (= 1,2,...,m)は観測点を表し、対象モデルにおいては、層別沈 下計 6 箇所,沈下板 3 箇所,および間隙水圧計 4 箇所の計 13 点の観測点が配置されているため、m = 13 となる。Iは m 次の単位行列であり、式(9)は以下のように書き換え られる。

$$\boldsymbol{R}_{t} = \begin{bmatrix} (\boldsymbol{\xi} \cdot \boldsymbol{O}_{\max}^{1})^{2} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & (\boldsymbol{\xi} \cdot \boldsymbol{O}_{\max}^{2})^{2} & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & (\boldsymbol{\xi} \cdot \boldsymbol{O}_{\max}^{13})^{2} \end{bmatrix}$$
(10)

本手法を数値実験ではなく実構造物の施工に適用することを想定した場合,事前設計段階では O_{max}^n が得られないため、上式をそのまま使うことはできない。よって本計算では、実際問題への適用を考慮し、事前設計段階で得られた各観測点における平均値予測の結果を O_{max}^n として用いる。

データ同化において「観測誤差」は、「観測データと予 測結果の差」として定義される²²⁾。観測計器の特性等に起 因するいわゆる「測定誤差」は観測誤差に寄与する要素の 一部と考える。このような定義に基づくと、観測誤差共分 散行列はいわゆる「測定誤差」のみならず、「シミュレー ションモデルと観測の差」も含めて評価し設定する必要が ある。一般的にこれらの値を定量的に評価し設定すること は困難であるが、著者らの行った実地盤を対象としたデー タ同化¹⁸⁾より、観測誤差共分散行列を式(9)で表現し、*ξ*=

True value

t = 110 day

0.35

t = 110 day

0.008

0.40

0.010

0.004

0.003

0.002

0.001

0.000

0.004

0.003

Weight Weight

0.001

0.000

0.000

0.002

0.05

0.10

0.15

0.20

True value

0.004

Compression index,

0.25

0.006

Coefficient of secondary compression, α

0.30

λ

Weight

0.1~0.3の値を用いることで精度の高いパラメータが同定 できることを確認している。以上のことを踏まえ、本研究 においても式(9)により、観測誤差共分散を評価する。

検証結果を図9に示す。図9は盛土開始から110日時点 で得られた同定パラメータによる再解析結果であり、示し た時間沈下曲線は盛土中央地表面、水圧の消散特性は盛土 中央深部の水圧計から得られたデータを表す。なお、5パ ターンの ζ(0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5) に対して感度計算 を行った結果、ζの違いによらずほぼ同一の結果が得ら





422

れたことから,ここでは, ξ =0.3の結果のみ示した。図9 に着目すると,同定パラメータを用いた予測結果は,疑似 観測データとほぼ一致することから,PFにより予測精度 の高い弾粘塑性パラメータが同定できることがわかる。

なお、PFを用いたパラメータの同定精度は、観測デー タの種類、粒子数、誤差共分散行列、同定パラメータ数に 大きく左右されるが、これらの条件の違いが同定結果に及 ぼす影響について、以下の知見が得られている²³。1)より 多くの観測データを用いることで、精度の高い同定が可能 となる。その際、間隙水圧は有効なデータとなる、2)より 多くの粒子数を用いることで、精度の高いパラメータ同定 が可能となる、3)同定パラメータ数の増加に伴い同定精度 は低下するが、より多くの粒子数の使用によって改善され る。

一方,図 10 は、110 日経過時点における各同定パラメ ータの重みの分布性状を示している。これらの図より、PF の特長である、状態変数(地盤パラメータや変位・間隙水 圧)の任意の確率分布を評価できるとともに、その分布が 観測データの取得により更新されるということが理解さ れる。

3.6 観測施工段階の性能照査および対策工の検討

ここでは,疑似的な観測データを用いて,施工中の性能 照査方法および対策工選定の具体的手順を示す。

施工中に得られる観測データは、以下の4種類に分類す ることができる。

- 性能規定は満足するが、設計段階で設定した粒子では その挙動を表現できないデータ
- ② 性能規定を満足するとともに、設計段階で設定した粒子でその挙動が表現可能なデータ
- ③ 性能規定は満足しないが、設計段階で設定した粒子で その挙動が表現可能なデータ
- ④ 性能規定は満足せず、設計段階で設定した粒子ではその挙動を表現できないデータ

上記①④に該当する観測データが得られる場合, PF が機 能しないため,初期に設定した粒子を再設定する必要があ る。このような再設定の問題を避けるために,設計段階に 大きな標準偏差を用いることも考えられるが,標準偏差の 値は要求性能の超過確率や LCC に大きく影響するため, このような安全側の設定が非経済的な設計に繋がりかね ない。本文では簡単のため,上記③の観測データが得られ

ない。本文では間単のため、上記③の観測データが待られ ると仮定し、施工中の性能照査・対策工法の選定方法につ いて示す。

3.6.1 観測施工段階における性能照査

工事が始まり,計画工程に従ってまずサンドマットの盛 立てが実施される。信頼性の観点から,できるだけ多くの 観測データに基づいて性能照査することが推奨されるが, 実際に対策工を適用する場合には,次の盛立て開始までに 設計や施工計画の変更,資材などの準備を完了させるため の十分な期間を確保する必要がある。ここでは便宜的に,



表7 観測施工時における性能照査結果

Case	C _i (million yen)	P _m C _m (million yen)	LCC (million yen)	P _{EX} (%)
4-DS	60.2	75.5	135.7	5.6
4-OS	60.2	117.0	177.2	99.9

各段階の盛立て完了から次の盛立て開始までの中間の時 点を最適な意思決定のタイミングと仮定し,その時点での データ同化結果に基づいて性能照査を行い,追加対策工の 必要性について検討する。

用いた疑似的な観測データを図 11 に示す。図中の〇が 性能照査に用いる疑似観測データを表し、点線は事前設計 段階での地盤挙動の予測結果を表す。ここでは代表的な観 測点として、図9と同様に、盛土中央部の地表面沈下と盛 土中央深部の間隙水圧のデータのみ示したが、図4に示し たすべての観測点から継時的にデータが得られるものと する。この疑似観測データは、先述した③に分類され、観 測施工時の性能照査方法および対策工の選定方法を示す ことを目的に設定したものである。そのため、図9に示し た Observation data と図 10 の Synthetic observation data は全 く異なるデータであることに注意されたい。

先述した仮定に基づき,サンドマット盛立完了から 100 日経過後(盛土建設開始から 110 日経過後)に性能照査を 行った結果を表 7 に示す。表中の Case における DS は事 前設計段階の結果,OS は観測施工段階の結果を意味する。 なお、ここでの P_{EX} および LCC は、式(9)における $\xi \in 0.3$ として算定した結果である。PF における観測誤差分散行 列 R_t は、観測データと予測結果の信頼の程度を表し、一 般に、観測値が包含する観測誤差と解析値が包含するモデ ル誤差(構成モデルや解析手法,解析パラメータが含む誤 差)を考慮して決定される。 R_t を規定する ξ は、予測され る変位の相対的な誤差の大きさを表す。この値は、実際の 予測実績などから決定されるべきであるが、ここでは、一 例として、 ξ =0.3 と設定した。これは、予測変位量の標準 偏差が最大観測変位量の0.3 倍であると想定することを意 味する。

表7に示したように,施工中の観測データを用いた性能 照査によって,当該盛土構造物は性能規定を満足しないと 判定された。よって,性能規定を満足させるための対策工 について検討する。

3.6.2 観測施工時における対策工法の検討

構造物の施工中においても適用可能な残留沈下低減対 策として,軽量盛土工法を採用する。この工法は,軽量な 地盤材料を盛土材として用いることで,基礎地盤の沈下量 の低減を期待するものである。軽量盛土工法には種々の工 法が提案されているが,ここでは,気泡セメント盛土工法 (Foamed Cement Banking Method:以下,「FCB 工法」と呼 ぶ)に着目する。FCB 工法では,気泡混合軽量土が盛土材 として用いられるが,この材料はセメント・砂・水および 起泡剤からなり,その配合を調節することで,盛土材料の 流動性や重量,強度を任意に設定することが可能である。 さらに,砂以外にも建設副産物として発生した汚泥などの 材料も母材として利用できることから,盛土工事において 多くの使用実績がある。

FCB 工法の有限要素解析上のモデル化は,既往の文献

表8 気泡混合軽量土の物性

$\gamma_{\rm FCB}({\rm kN/m^3})$	V	$E (\mathrm{kN/m^2})$
10.0	0.20	5000









図 12 施工段階における対策工:FCB 工法

表9 施工時各対策案のPex, LCC 算定結果

Thickness of FCB(m)	C _i (million yen)	P _m C _m (million yen)	LCC (million yen)	P _{EX} (%)
2.0	72.4	91.5	163.9	0.0
4.0	158.4	72.8	231.2	0.0
6.0	258.0	54.2	312.2	0.0
8.0	371.2	30.4	401.6	0.0



図 13 施工時各対策案の LCC, C_i, P_mC_mの関係

⁴⁾に従った。具体的には,FCB部分を線形弾性体としてモ デル化し,その材料定数として表8の値を用いた。対策工 案として,FCB 盛土厚さの異なる計4ケースを考え(図 12),各ケースに対して,事前設計段階で実施した手順に 従い, P_{EX} およびLCCの計算を行う。LCC算定式におけ る P_{m} は、サンドマット施工完了から100日経過後の信頼 度($\tilde{w}_{t}^{(l)}$)から計算される。なお、FCBの物性のバラツキ は小さいものとし、MCSにおいては固定値とする。すな わち、これまでと同様に、表5の性質を有する乱数に基づ いたMCSを実施する。

FCB 工法を用いた対策工4ケース (FCB 盛土厚さ2.0m, 4.0m, 6.0m, 8.0m) に対する P_{EX}および LCC の算定結果 を表9および図 13 に示す。ここで C_iは FCB による対策費 用のみを表し, 盛土の施工費用および SD による地盤改良 費用は含まない。算定結果より, FCB の採用によって残留 沈下が顕著に抑えられ, FCB 盛土厚さが 2.0m であったと しても性能規定を十分満足する結果となった。また FCB による盛土厚さが厚くなる場合にはその費用対効果は小 さくなることがわかる。今回は4ケースの計算例のみ示し たが, FCB 盛土厚さ 2.0m 以下の計算も実施することで, より合理的な対策が提案できるものと考えられる。

FCB 工法による対策を施したのち,フローに従い,施工 完了まで逐次的な性能照査を実施する。性能規定を満たさ ない場合は,再び対策工を検討し,この方法を盛土完了ま で繰り返す。 これまでの仕様設計体系においては、より大きな安全率 を見込むことにより、すなわち、より高い初期投資を行う ことにより、構造物の性能を確保することが慣用的に行わ れてきた。しかしながら、本文で示した一連の結果は、提 案手法によって土構造物の性能をより効率的・経済的に確 保するとともに、その信頼度を定量的に説明できる可能性 を示唆している。

提案手法では、PF によるデータ同化(信頼度の更新・ 解析結果の補正)が重要な役割を果たしており、この精度 が本手法の有効性を大きく左右する。本稿では数値実験を 対象とした解析により、すなわち、地盤の挙動が数値シミ ュレーションによって完全に再現できるという理想的な 条件の下で、提案手法の有効性について議論した。実地盤 を対象とした場合、その挙動を数値シミュレーションで再 現・予測することは困難となるが、本文で示したデータ同 化手法は、数値実験のみならず、模型実験²⁴⁾や実地盤¹⁸⁾ においても十分機能することが実証されてきている。この ことは、本文で提案した信頼性解析手法が、実構造物へも 適用可能であることを示唆している。今後、本手法をより 多くの実構造物の設計に適用し、その有効性について議論 することが求められる。

4. 結論

本研究では、土構造物の性能照査に適用可能な信頼性解 析手法を新たに提案し、その適用性について、軟弱地盤上 に建設される盛土の残留沈下問題を対象とした数値実験 により検証した。本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 地盤の統計的性質を考慮した MCS により,残留沈下 に関する要求性能の超過確率を定量的に説明できる ことを示した。
- (2) 設計段階における最適な地盤改良案や,観測施工時に おける残留沈下対策の最適案を,LCCによって決定す る方法の一例を示した。
- (3) PF による信頼度の更新に基づいた性能照査方法,お よび対策工実施可否の意思決定方法について示した。 本文で示した一連の結果は,提案手法が,変形に関して

定量的・明示的な性能が規定された土構造物の性能照査手 法として有効な手段となる可能性を示唆している。

参考文献

- 1) 本城勇介:地盤構造物の性能設計,土と基礎, Vol.50, No.1, pp.1-3, 2002.
- 2) 高橋朋和、川井田実、土谷和博、新井新一:高速道路における 建設費と管理費を考慮した軟弱地盤対策工法の事後評価、土木 学会論文集, No.693/VI-53, pp.47-59, 2001.
- 竜田尚希,稲垣太浩,三嶋信雄,藤山哲雄,石黒 健,太田秀 樹:軟弱地盤上の道路盛土の供用後長期変形挙動予測と性能設 計への応用,土木学会論文集,No.743/III-64,pp.173-187,2003.
- 4) 稲垣太浩,三嶋信雄,武部篤治,藤山哲雄,石黒健,太田秀 樹:軟弱地盤上の道路盛土に対する性能設計の試み,土木学会

論文集, No.771/III-68, pp.91-110, 2004.

- 5) 川井俊介, 稲垣太浩, 堀越研一, 板清 弘, 三嶋信雄, 太田秀 樹:軟弱地盤上の橋台の変形対策とその費用対効果に関する解 析的検討, 土木学会論文集 C, Vol.62, No.3, pp.605-622, 2004.
- Iizuka, A. and Ohta, H.: Determination procedure of input parameters in elasto-viscoplastic finite element analysis, Soils and Foundations, Vol.27, No.3, pp.71-87, 1987.
- Brand, E. W. and Premchitt, J.: Comparison of the predicted and observed performance of the Muar test embankment, Proceedings of the International Symposium on Trial Embankments on Malaysian Marine Clays, Kuala Lumpur, Vol.2, pp.10.1-10.29, 1989.
- 松尾 稔:地盤工学ー信頼性設計の理念と実際-,技報堂出版, 1984.
- Asaoka, A.: Observational procedure of settlement prediction, Soils and Foundations, Vol.18, No.4, pp.87-101, 1978.
- Gilbert, R. B., Wright, S. G. and Liedtke, E.: Uncertainties in back analysis of slopes: Kettleman Hills case history, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol.124, No12, pp.1167-1176, 1998.
- Cheung, R. W. M. and Tang, W. H.: Realistic assessment of slope reliability for effective landslide hazard management, Geotechnique, Vol.55, No.1, pp.85-94, 2005.
- Gordon, N. J., Salmond, D. J. and Smith, A. F. M.: Novel approach to nonlinear/non-Gaussian Bayesian state estimation, IEE Proceedings F, Vol.140, pp.107–113, 1993.
- Kitagawa, G.: Monte Carlo filter and smoother for non-Gaussian nonlinear state space models, Institute of Statistical Mathematics Res.Memo, 1993.
- Kitagawa, G.: Monte Carlo filter and smoother for non-Gaussian nonlinear state space models, Journal of Computational Graphical Statistics, Vol.5, pp.1-25, 1996.
- 北海道開発土木研究所:泥炭性軟弱地盤対策エマニュアル, 2002.
- 16) 渡部要一,植田智幸,三枝弘幸,田中正典,菊池嘉昭:性能設 計概念に基づいた実用的土質定数決定法,土木学会論文集C, Vol.63, No.2, pp.553-565, 2007.
- 村上 章,西村伸一,藤澤和謙,中村和幸,樋口知之: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,Vol.12, pp.99-105,2009.
- 18) 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, Vol.13, pp.99-105, 2010.
- 19) 樋口知之:粒子フィルタ,電子情報通信学会誌, Vol.88, No12, pp.989-994, 2005.
- 20) 矢部 満,阿部知之,本多 隆:現場サンドドレーン改良地盤 に対する見かけの透水係数の評価事例,第32回地盤工学研究発 表会,pp.1357-1358,1997.
- 21) 神戸空港変形解析検討会:神戸空港変形解析報告書(平成14年 10月),60pp,2003.
- 22) 統計数理研究所:2008年公開講座資料「データ同化論:状態空間モデルとシミュレーション」, pp.27-40, 2008.
- 23) 珠玖隆行,村上 章,西村伸一,藤澤和謙,中村和幸:フィル タ特性が地盤挙動のデータ同化結果に及ぼす影響,第45回地盤 工学研究発表会,pp.759-760,2010.
- 24) 珠玖隆行,村上 章,西村伸一,藤澤和謙,中村和幸,亀谷 聡: 局所載荷模型実験における変形計測値のデータ同化,第44回地 盤工学研究発表会, pp.851-852,2009.

(2011.2.28 受付)

Performance verification for geotechnical structures using reliability analysis based on data assimilation

Takayuki SHUKU¹, Shin-ichi NISHIMURA¹, Akira MURAKAMI², Yuki NISHIMURA¹ and Kazunori FUJISAWA¹

- 1 Graduate School of Environmental Science, Okayama University
- 2 Graduate School of Agriculture, Kyoto University

Abstract

The structural design codes in Japan have been transferred from designs based on conventional factor of safety, commonly used in design practice, to a performance-based designs founded on reliability-based designs which can quantitatively evaluate the performance of structures. There are several technical issues to be addressed in performance-based designs for geotechnical structures, namely, the lower accuracy of the design/prediction procedures and inherent uncertainties of the soil parameters. A novel framework for reliability-based designs based on the observational method, which can be used as a performance verification method for geotechnical structures, is herein proposed to overcome such issues. The proposed method is applied to numerical examples of an embankment construction on a clay foundation herein to examine its applicability. From the results of the numerical examples, it has been revealed that the proposed method can be applied to quantitative and specified performance requirements and that it is a helpful tool for performance-based designs in geotechnical engineering.

Key words: reliability-based design, performance verification, LCC, data assimilation, particle filter