

データ同化による地盤構造物内の劣化箇所同定に関する基礎的研究

Fundamental Study for Identification of Degraded Area in Geotechnical Structures using Data Assimilation

珠玖隆行*・西村伸一**・藤澤和謙***

Takayuki SHUKU, Shin-ichi NISHIMURA and Kazunori FUJISAWA

* 博（環境）岡山大学大学院助教，環境学研究科（〒700-8530 岡山県岡山市北区津島中3丁目）

** 博（農）岡山大学大学院教授，環境学研究科（〒700-8530 岡山県岡山市北区津島中3丁目）

*** 博（農）岡山大学大学院講師，環境学研究科（〒700-8530 岡山県岡山市北区津島中3丁目）

This study has proposed a novel method for identifying degraded areas in geotechnical structures such as piping holes and cavities due to seepage flow using data assimilation. An existing method for identifying degraded areas using the particle filter, which was proposed by the authors, cannot identify the degraded areas with high accuracy in case of simultaneous identification of several degraded areas. To overcome the above technical issue, the more advanced method with a step-by-step identification procedure is newly proposed. In this paper, numerical tests of a geotechnical structure loaded by a road-roller are conducted to study whether the proposed procedure can identify several degraded areas. The results of numerical tests show that the proposed procedure can identify several degraded areas in geotechnical structures with high accuracy.

Key Words: Geotechnical structures, degraded area, data assimilation, particle filter

1. はじめに

近年，高度成長期に整備された社会資本の耐用年数が過ぎ，今後それらをどのように維持管理していくかが喫緊の課題となっている．効率的な維持管理のためには，現在の構造物の状態を診断し，その結果に基づいて補修・維持管理計画を立てる必要がある．河川堤防やアースフィルダム等の地盤構造物も例外ではなく，構造物の状態を診断し，その結果を今後の維持管理計画に反映させることが求められる．

地盤構造物は，長年にわたって改修や補修が繰り返され，一見すると構造的に問題ない構造物が多い．しかしながら，地盤構造物は不確定性の高い材料により構成されるため，延長方向にも横断方向にも不均質になっていることが多く，場合によっては浸透流によるパイピングホールや空洞等のゆるみ領域（弱部）が存在する事例もみられる．Foster *et al.*¹⁾は，過去のフィルダムの崩壊事例を調査した結果，その46%がパイピングに起因するものであったと報告しており，地盤構造物内部の劣化箇所を診断し，豪雨時や地震時の崩壊に対して安全な構造物として維持管理していく必要がある．

構造物の診断方法として，サウンディングや物理探査等種々の方法が利用されているが，単一の技術によって正確

に問題を抽出することは未だ困難といえる．よって，複数の方法を適切に組合せ，その結果を総合的に判断し，診断能力，欠陥抽出能力を向上させることが期待される．

このような背景から著者ら²⁾は，データ同化³⁾の分野で広く応用されている粒子フィルタ^{4,5)}（以下，「PF」と表記する）に着目し，地盤構造物内の劣化箇所同定手法を新たに提案した．さらに著者ら²⁾は提案手法の有効性について数値実験を対象に検証し，1)劣化箇所が1箇所の場合，その位置と範囲が精度良く同定できる，2)劣化箇所が2箇所の場合，それらの位置・範囲ともに同定が困難となる，3)互いに相関を持たせた半径一定の複数の同定円を用いることによって，任意の形状をもつ劣化箇所を同定しうる，ことを明らかにしている．

本研究では，データ同化・PFに基づいた劣化箇所同定手法の高度化を目的とする．とくに，地盤構造物内に複数の劣化箇所が存在する場合の同定精度を向上させることに焦点を絞り，新しい同定手法の構築を試みる．はじめに，データ同化の概要について述べるとともに，本研究で用いたPFの定式化について簡単に示す．その後，著者ら²⁾が提案した既存の劣化箇所同定方法（以下，従来法と表記する）の概要を示し，より実際の問題を想定した数値実験を対象にその再検証を行う．さらに，得られた結果に基づいて従来法を再考し，地盤構造物内に劣化箇所が複数存在する場合においてもそれらの位置と範囲を精度良く同定し

うる手法を新たに提案する。また、提案した同定手法を数値実験に適用し、その有効性について議論する。

2. 劣化箇所同定方法

2.1 PF によるデータ同化

本節では、本研究で用いるデータ同化とその具体的方法である PF について概説する。

データ同化とは、演繹的推論（シミュレーション）と帰納的推論（数理統計）を組合せ、実現象に即した精度の高い予測を実現するための方法論である³⁾。データ同化は、気象学や海洋学といった地球科学の分野で用いられてきた方法であるが、工学の分野で用いられてきた「逆解析」とほぼ同義であり、両手法に共通点がみられる。

代表的なデータ同化手法として Kalman Filter が挙げられるが、近年ではその発展版である、Ensemble Kalman Filter⁶⁾や PF が提案され、種々の問題に適用されている。とくに PF は、非線形・非ガウス性の問題にも容易に適用可能であり、地球科学の分野にとどまらず、工学の分野にも広く応用されている。

PF の構造工学への適用例として、佐藤ら^{7,8)}、吉田ら⁹⁻¹²⁾の一連の研究を挙げることができる。なお、これらの文献中では、PF を「モンテカルロフィルタ」と表記しているが、PF と同様の手法であるため、本論文では「PF」に統一して表記する。佐藤・梶⁷⁾、佐藤・田中⁸⁾は、PF に基づいた構造システムの動特性を同定するためのアルゴリズムを開発し、その有効性について数値実験、振動台実験、実大構造物を対象に検証している。また、吉田・佐藤⁹⁾は、構造物の損傷同定に PF を応用するとともに、サンプル数、観測位置や損傷位置と損傷同定結果の安定性の関係について定量的に評価している。さらに吉田ら¹⁰⁻¹²⁾は、PF を RC 構造物の塩害劣化予測のパラメータ更新に応用し、維持管理のための信頼性評価手法への有効性について検討している。

一方、地盤工学の分野においても PF の有効性が着目されている。村上ら¹³⁾は、既存の手法では限界があった弾塑性パラメータの同定問題に PF を適用し、その有効性について土/水連成問題を対象とした数値実験により実証している。さらに、PF を神戸空港島の沈下問題へ適用し、実地盤の挙動を精度よく予測しうるパラメータの同定に成功している¹⁴⁾。

PF は、着目するパラメータの確率密度関数を多数の離散サンプルで近似し、その分布を逐次的にベイズ更新するアルゴリズムを有している。この離散サンプルを“粒子”と呼ぶ。このようなモンテカルロ近似により、高次元の予測分布 $p(x_t | y_{1:t})$ やフィルタ分布 $p(x_t | y_{1:t})$ を適切に表現しながら、積分計算を含む逐次更新式が容易に計算できる。例えば、時間 t におけるフィルタ分布 $p(x_t | y_{1:t})$ は、粒子数 N のアンサンブル $\{x_{t|t}^{(i)}\}_{i=1}^N$ によって、

$$p(x_t | y_{1:t}) = \frac{1}{N} \sum \delta(x_t - x_{t|t}^{(i)}) \quad (1)$$

と近似される。ここで δ は、Dirac のデルタ関数である。同様に、時間 t の予測分布のアンサンブル近似が、

$$p(x_t | y_{1:t-1}) = \frac{1}{N} \sum \delta(x_t - x_{t|t-1}^{(i)}) \quad (2)$$

と表現される。ここで、予測アンサンブル $\{x_{t|t-1}^{(i)}\}_{i=1}^N$ の各粒子は、システム方程式 $F_t(x_{t|t-1}^{(i)}, v_t^{(i)})$ から得られる。

Bayes の定理を用いると、時刻 t における予測分布 $p(x_t | y_{1:t})$ と観測データ y_t から、フィルタ分布 $p(x_t | y_{1:t})$ が、

$$\begin{aligned} p(x_t | y_{1:t}) &= \frac{p(x_t | y_{1:t-1})p(y_t | x_t)}{\int p(x_t | y_{1:t-1})p(y_t | x_t)dx_t} \\ &\approx \frac{1}{\sum_j p(y_t | x_{t|t-1}^{(j)})} \sum_{i=1}^N p(y_t | x_{t|t-1}^{(i)}) \delta(x_t - x_{t|t-1}^{(i)}) \\ &= \sum_{i=1}^N w_t^{(i)} \delta(x_t - x_{t|t-1}^{(i)}) \end{aligned} \quad (3)$$

のように得られる。ここで、 $p(y_t | x_{t|t-1}^{(i)})$ は、観測データ y_t が与えられたときの $x_{t|t-1}^{(i)}$ の尤度である。また w_t は重みであり、

$$w_t = \frac{p(y_t | x_{t|t-1}^{(i)})}{\sum_j p(y_t | x_{t|t-1}^{(j)})} \quad (4)$$

と定義される。

PF では予測アンサンブル $\{x_{t|t-1}^{(i)}\}_{i=1}^N$ から各粒子 $x_{t|t-1}^{(i)}$ が確率 $w_t^{(i)}$ で抽出されるとし、 N 回の復元抽出を行うことで、新たなアンサンブル $\{x_{t|t}^{(i)}\}_{i=1}^N$ を生成し、 $p(x_t | y_{1:t})$ を近似し直す「リサンプリング」という操作を行う。このとき、リサンプリングされた $\{x_{t|t}^{(i)}\}_{i=1}^N$ には、 $\{x_{t|t-1}^{(i)}\}_{i=1}^N$ を構成する粒子のうち、尤度（重み）の最も高いものの複製が多数含まれる。上記のアルゴリズムは、Sampling Importance Resampling (SIR)⁴⁾と呼ばれている。

一方、リサンプリングを行わず、計算した重みのみを逐次的に更新するアルゴリズムは Sequential Importance Sampling (SIS)¹⁵⁾と呼ばれている。このアルゴリズムでは、リサンプリングは行わないため、同じ予測アンサンブル $\{x_{t|t-1}^{(i)}\}_{i=1}^N$ を計算開始から終了まで使い続ける。SIS を用いると確率分布が少数の粒子によって近似される「縮退」と呼ばれる現象が生じやすいことから、その適用範囲が限定されるが、その挙動が応力履歴に依存する弾塑性構成モデルに対しては SIS が有効であることが報告されている¹⁶⁾。

本研究では、アルゴリズムの違いによる同定結果の違いを検討するため、上記の SIR と SIS の両アルゴリズムを用いる。なお、SIR においてリサンプリングを行った場合、各粒子が抽出される回数の期待値は $Nw_t^{(i)}$ 回となる。しかしながら、ランダム抽出を行っているため、実際の抽出回

数は期待値から幾分か外れてしまい、得られたアンサンブルの分布が、本来の分布とは異なった形状になってしまう可能性がある¹⁷⁾。よってここでは、抽出される粒子数の比が尤度比になるべく近くなるよう、以下の方法によりリサンプリングする¹⁷⁾。

- 1) $Nw_t^{(i)}$ の整数部分を $\bar{m}_t^{(i)}$ として、まず、各粒子 $x_{t|t-1}^{(i)}$ をそれぞれ $\bar{m}_t^{(i)}$ 個抽出する。これで、 $\sum_{i=1}^N \bar{m}_t^{(i)}$ 個が確定する。
- 2) 粒子数を N 個にするために、各粒子 $x_{t|t-1}^{(i)}$ が $(Nw_t^{(i)} - \bar{m}_t^{(i)}) / (N - \sum_{i=1}^N \bar{m}_t^{(i)})$ の確率で抽出されるようなランダム抽出によって、不足分 $N - \sum_{i=1}^N \bar{m}_t^{(i)}$ 個の粒子を抽出する。

SIR のリサンプリングにおいては上記のアルゴリズムを用いる。

2.2 従来法による劣化箇所同定手順

PF を用いた既存の劣化箇所同定手順を図-1 示す。劣化箇所中心の空間的な位置（水平距離 x 、鉛直距離 y ）とその大きさ（半径 r ）を状態変数として、適切な数のサンプルを準備する。この実現値集合が、同定する劣化箇所の初期分布となる。その後、逐次的に得られる観測データに基づいて初期分布を更新するとともに、劣化箇所を同定する。本手法では、劣化箇所の同定結果として、以下に示すアンサンブル平均を用いる。

$$\bar{\phi}_t = \sum_{i=1}^N w_t^{(i)} \phi_t^{(i)} \quad (5)$$

ここに、 $\bar{\phi}_t$ は同定パラメータ、 $w_t^{(i)}$ は先述した重み、 $\phi_t^{(i)}$ は時刻 t における粒子番号 i の実現値 ($x^{(i)}$, $y^{(i)}$, $r^{(i)}$) を表す。

以上に示した手順は、PF を利用した劣化箇所同定の最

もシンプルな方法であり、この簡便法がどの程度の検出能力を有するかを数値実験により確認する。

3. 適用例

3.1 数値実験の手順

前章で示した既存の劣化箇所同定手法の有効性について、数値実験を対象に検証する。数値実験の手順は次の通りである。はじめに、任意の位置と範囲に劣化箇所を考慮した解析を実施し、得られた結果を観測データとする。その疑似観測データに基づいた PF によって、劣化箇所の位置と範囲が同定可能かを検証する。このように、データ同化手法を検証するための数値実験を、地球科学の分野では「双子実験」と呼ぶ。双子実験では、疑似観測データをそのまま同化に用いるのではなく、データを任意の時間間隔で間引くことや人工的なノイズを加えることがしばしば行われる。しかしながら本計算においては、これらの操作を施さない、理想的な条件の下で観測データが得られるものとして計算を行う。

3.2 解析条件

解析手法として線形弾性モデルを用いた有限要素解析を用いる。なお、本研究では簡単のため、非連成解析としている。解析対象（有限要素メッシュ図）を図-2 示す。ここでは、幅 40.0m、高さ 15.0m の地盤構造物を設定した。境界条件として、両側面で水平変位固定、底面で完全固定条件とした。図中の「settlement gauge」は沈下観測点を表し、観測点上部に示した数字は観測点番号を意味する。

地盤構造物の材料定数および劣化箇所の材料定数は表-1 に示す値を用いた。実際の劣化箇所は、種々の状態で存在することが推察されるが、地盤構造物と比較して十分に小さな剛性を与えることで表現した。

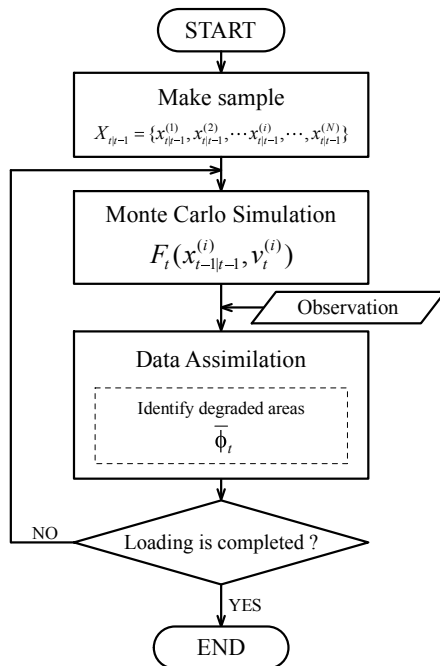


図-1 劣化箇所同定フロー（従来法）

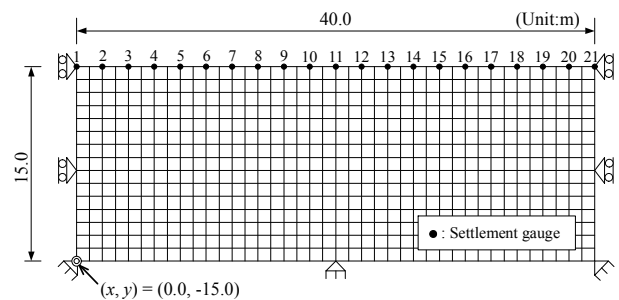


図-2 有限要素メッシュ

表-1 地盤構造物および劣化箇所の物性

	Elastic modulus E (kN/m ²)	Poisson's ratio ν
Geotechnical structure	10000	0.30
Degraded area	10	0.49

図-2 に示した地盤構造物内に表-2 の条件に従う一様乱数によって劣化箇所を割り当てる。具体的には、要素の中心座標が、乱数により与えられた x^0, y^0 を中心座標とする半径 r^0 の同定円内に包含される場合、それらの要素を劣化箇所と判定し、物性を変更する。図-3 にこの関係を模式的に示す。

より実際的な問題を想定し、運転重量約 1.2t のロードローラーの走行を模擬した静的荷重を地表面作用させる(図-4)。運転重量の半分 (0.6t) を単位奥行きで受け持つと仮定し、解析上、前輪部に 25kN、後輪部に 35kN の荷重を作用させる。要素は 1m の正方形であるため、単位面積当たり、前輪部 25kN/m²、後輪部 35kN/m² の荷重が作用することになる。観測点として、沈下計を地表面に 2.0m の間隔で配置し、全観測点から逐次的に観測データが得られると仮定した。その際、観測データにノイズは含まれないと仮定している。後述する Case1 において用いた観測デ

ータを図-5 に示す。横軸の Loading step は、ロードローラー1.0m の移動に対応する。すなわち、37step が解析対象の左端から右端までロードローラーが走行することに対応する。また、図中の gauge 6, 11, 16 はそれぞれ $x=10.0\text{m}$, 20.0m , 30.0m に位置する沈下計を意味する。

PF の計算に必要な観測誤差共分散行列 R_t は、既往の研究¹⁴⁾を参考に次式により表現した。

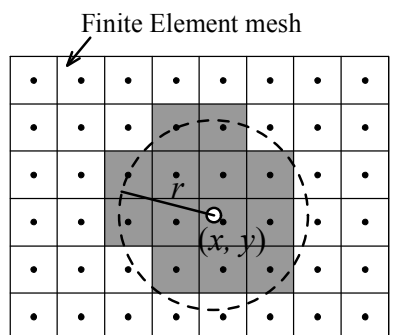
$$R_t = \sigma_i^2 \delta_{ij}, \quad \sigma_i = \xi s_i \quad (6)$$

ここに、 δ_{ij} は Kronecker デルタを表し、 ξ は分散の値を規定するスカラー、 s_i は観測データの絶対値の最大値を表す。 ξ については既往の研究¹⁴⁾を参考に 0.2 とした。本稿では、全ての計算において、式(6)で定義した R_t を用いる。

計算の実施ケースを表-3 にまとめる。ケース毎に同定する劣化箇所数や同定対象パラメータを変えた 4 ケースを実施する。このような単純な問題に対して、従来法が適用可能かを検証する。

表-2 粒子の発生範囲

Parameters	Range in particle generation
x (m)	2.0~38.0
y (m)	-2.0~-13.0
r (m)	1.0~2.0



- : Degraded area
- : Center of identification circle
- : Center of finite elements

図-3 乱数による物性変更の模式図

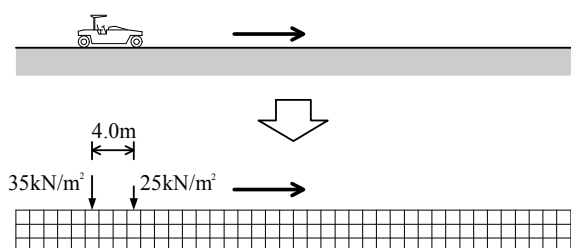


図-4 荷重条件

3.3 解析結果

図-6 は表-3 に示した Case 1~Case 4 の条件における劣化箇所の同定結果を表している。図中のグレーの部分が悪化箇所の真値であり、同定結果を赤線と青線の円で示した。なお、凡例にも示しているように、赤線が SIS の結果であり、青線が SIR の結果である。

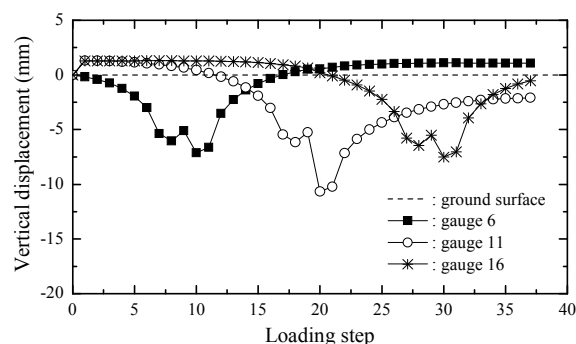


図-5 データ同化に用いる観測データの一例

表-3 計算実施ケース

Case	The number of degraded area	Parameters to be identified
1	1	The center of identification circle
2	1	The center of identification circle and the radius
3	2	The center of identification circle
4	2	The center of identification circle and the radius

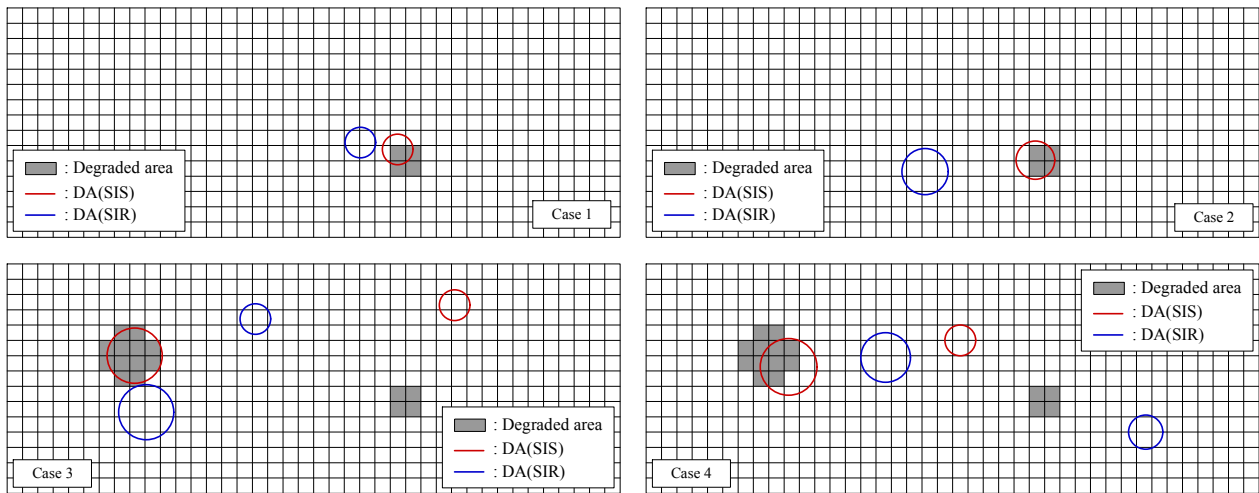


図-6 劣化箇所同定結果 (Case 1~4)

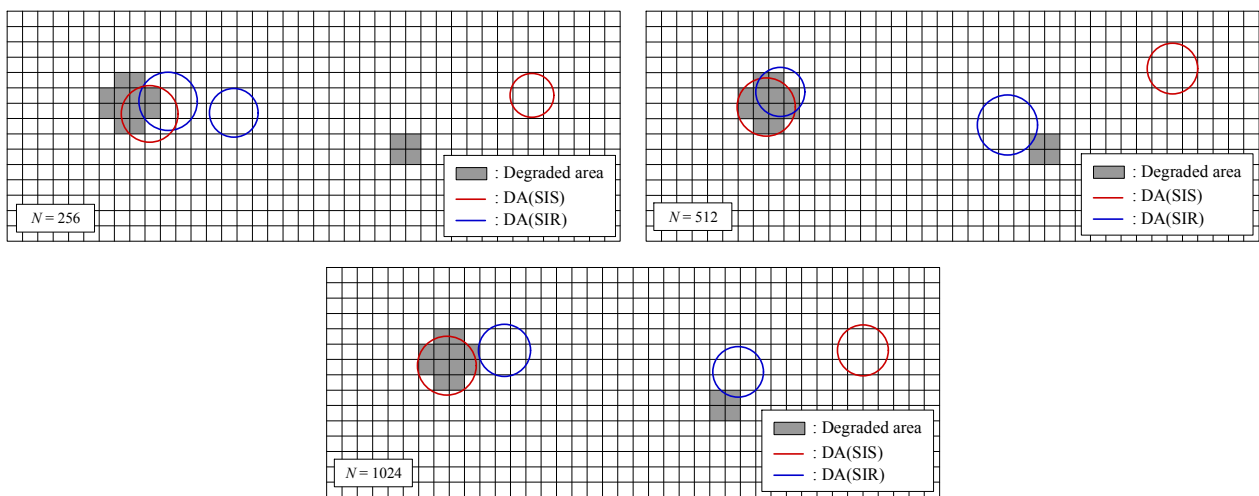


図-7 劣化箇所同定結果 (Case4, $N=256, 512, 1024$)

Case 1, Case 2 に着目すると、想定した劣化箇所の位置を精度よく同定できていることがわかる。劣化箇所が1箇所である場合、劣化箇所が浅部になればなるほど、また、劣化領域が広範囲になればなるほど観測値への影響度が高くなり、その同定精度が向上していくことは明らかであるが、Case1 に示したような、構造物深部に存在する比較的小規模な劣化箇所についても同定可能であることがわかる。劣化箇所の位置と範囲の同定を試みた Case 2 に着目すると、位置だけでなく、その範囲も精度良く同定できることがわかる。SIS と SIR の結果を比較すると、Case 1, Case 2 では明らかに SIS が SIR よりも精度が高いことがわかる。

一般的に、地表面で観測された変位データのみから劣化箇所の水平方向位置と深度を同時に同定することは困難と考えられるが、劣化箇所の位置や形状が少しでも観測データに影響する、換言すれば、観測データに対して少しでも感度がある状態変数を同定すれば、PF (Bayes の定理) によって重みが更新されることになる。このことが、地表

面のデータのみから劣化箇所が同定できることにつながる。

一方、劣化箇所が2つ存在する Case 3 と Case 4 に着目すると、どちらの条件においても、劣化範囲・劣化箇所ともに精度良く同定できていないことがわかる。観測データへの感度が高いと考えられるメッシュ図左側の浅部の劣化箇所周辺に同定円が集まる傾向にあり、メッシュ図右側深部の小さな劣化箇所を検出することは困難である。

ここで、単純に粒子数 N を増加させた計算結果を図-7 に示す。ここでは、当初の粒子数 $N=128$ を2倍 ($N=256$)、4倍 ($N=512$)、8倍 ($N=1024$) した3ケースの結果を示す。図より、どの粒子数において劣化箇所の位置・範囲ともに同定には至っていないことがわかる。

3.4 劣化箇所同定フローの再考

図-1 に示した従来法を用いて、地盤構造物内の劣化箇所を検出した結果、著者ら²⁾が実施した数値実験でも確認されていた問題点、複数の劣化箇所が存在する場合に精度

良く機能しないこと、を再確認した。実際に調査対象となる地盤構造物内の劣化箇所数は事前に知ることはできないため、従来法において適切な同定パラメータ数や粒子数を適切に決定できない。また、たとえ同定箇所数が既知であったとしても、前頁の結果から、複数の劣化箇所の位置と大きさを同時に同定することは極めて困難である。よってここでは、従来法を再考し、劣化箇所が複数存在する場合にも精度の高い同定が実現できる手法の提案を目指す。

数値実験の結果、劣化箇所が2箇所以上存在する場合は、観測への感度が最も高い劣化箇所に同定円が集まることに着目し、劣化箇所を同時に推定するのではなく、観測データへの感度の高い劣化箇所から順次同定し、同定後は既知の劣化箇所として扱う手順を踏む。具体的なフローを図-8に示す。なお、説明の便宜上、図-1に示した同定方法を「従来法のフロー」、図-8に示した方法を「改良フロー」と表記する。

改良フローではまず、一つの劣化箇所のみの同定を対象として従来法のフローと同様の方法で計算を行う。この同定を「一次同定」と呼ぶ。その際、サンプルの生成にはより計算効率の高い超一様分布列¹⁸⁾を用いる。超一様分布列の構成法の詳細は付録Aおよび文献¹⁸⁾を参照されたい。

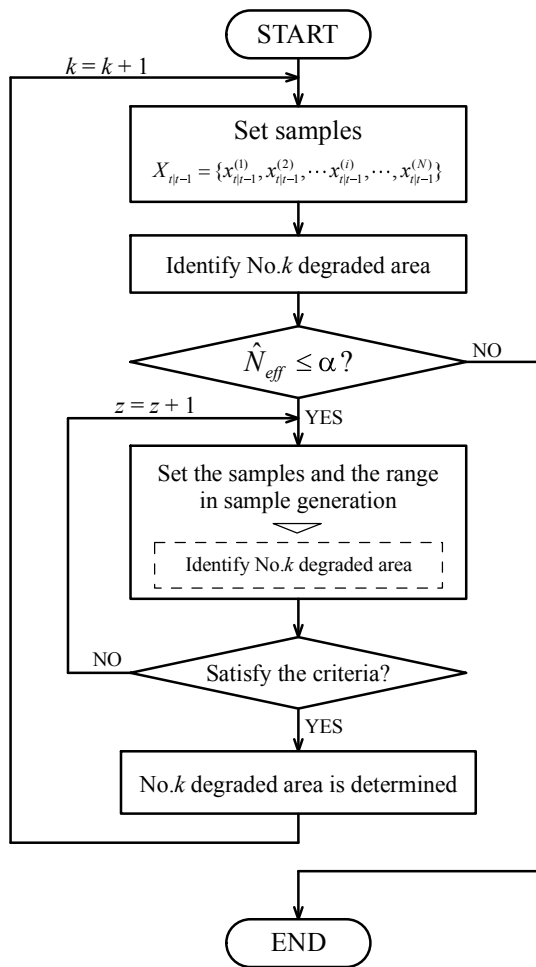


図-8 改良した劣化箇所同定フロー

次に、粒子の「縮退」の指標である有効サンプル数 $N_{eff}^{11),19)}$ を用いて、地盤構造物内の劣化箇所の有無を判定する。 N_{eff} は次式により定義される。

$$N_{eff} = \frac{1}{\sum_{i=1}^N (w_i^{(i)})^2} \quad (7)$$

ここに、 $w_i^{(i)}$ は式(4)で示した、正規化された重みを表し、 N はサンプル数を表す。上式より、全ての重みが同じ値を持つ場合、 $N = N_{eff}$ となり、退化が進行すれば、 N_{eff} は N よりも極端に小さくなる。本フローでは、 N_{eff} が閾値 α よりも大きい場合に、同定しうる劣化箇所が無いと判断する。上記の定義式より、 N_{eff} は同定劣化箇所の位置や大きさ（観測データへの感度）、観測ノイズ、観測誤差分散の値に大きく影響されることから、絶対的な指標として用いることは困難であると考えられるが、問題をある程度限定することで、劣化箇所有無の目安として利用できる可能性がある。本研究では、 N_{eff} に関する数値実験を実施し、その結果に基づいた考察により閾値 $\alpha = 30$ と決定した。なお、閾値決定のために実施した数値実験の詳細については付録Bを参照されたい。

改良フローに従い地盤構造物内に劣化箇所が存在すると判断された場合、一次同定で得られた結果に基づいて、計算条件の再設定を行う。具体的な再設定項目を以下にまとめる。

- 1) 劣化箇所の探索範囲の限定：一次同定結果を中心値として範囲を設定する。
- 2) 乱数の種類：一様乱数（もしくは超一様分布列）を用いてサンプルの生成を行う。
- 3) データ同化に使用する観測データ：一次同定で得られた領域周辺に設置された観測点のデータにのみ使用する。
- 4) 荷重の作用位置（ロードローラーの走行範囲）：劣化箇所周辺にのみ走行させたデータを使用する。

ここで、1)の範囲の設定に関して、客観的な指標に基づいて範囲を再設定することが困難であったため、便宜的にステップ z の増加に伴って探索半径をおおよそ $8.0\text{m} \rightarrow 6.0\text{m} \rightarrow 4.0\text{m} \rightarrow 2.0\text{m}$ の間隔で減少させることにより、劣化箇所の探索範囲を限定させることとした。上記の再設定を行い、これまでと同様の手順により、劣化箇所の同定を行う。

上記ステップは一次同定で得られた結果の精度向上が目的であり、同定結果が設定した基準（収束判定基準）を満たすまでサンプルおよび同定箇所探索範囲の再設定・劣化箇所の同定を繰り返す。なお、一様乱数を用いる場合、乱数の種は毎回変更することとした。ここでは基準の一例として、繰り返し回数 $z-1$ と z に対するそれぞれの同定パラメータの差の絶対値が 0.10m （半径は 0.05m ）以内と設定し、この基準を満たした場合に次ステップ $(k+1)$ へ進む。

その後、劣化箇所 k を既知として扱い、地盤構造物内に存在しうる劣化箇所 $k+1$ に対して再び、上記に示した手順を繰り返す。なお、全計算を通して SIS アルゴリズムを用い

る。

3.5 改良フローの適用例

ここでは、改良フローの適用例として、Case 4 を対象として劣化箇所が同定されていく過程を図-9, 10, 11 にまとめる。図-9, 10 が一次同定以外の過程で一樣乱数を用いた結果を示し、図-11 がすべての同定過程で超一樣分布列を用いた計算結果を示す。図-9, 10 では、乱数の違いによる同定結果の違いについて検討するため、異なる乱数の種を用いて同じ問題に対して計算した結果を示している。はじめに、Halton 列を用いて、表-2 の範囲でサンプルを作成し、一次同定を実施する。その際サンプル数 N は 256 とした。その結果得られた同定劣化箇所を平均値（中央値）とし、同定対象範囲を限定したサンプルを発生させ（図-9, 10, 11 参照）、再び同定を実施する。その際、計算コストの観点からサンプル数は 128 とし、一樣乱数および超一樣分布列により同定円を生成した。さらに、ロードローラーの走行荷重に関しても同定された劣化箇所への影響が大きい範囲に作用させたデータのみを用いる。また、ロードローラーの走行範囲が狭くなったことによる時間軸方向のデータ数の減少を補うため、ロードローラーを載荷対象範囲で往復させたデータを用いた。先述したように、次式を満足するまで上記の手順を繰り返す。

$$\begin{aligned} |\bar{x}_z - \bar{x}_{z-1}| &\leq 0.10\text{m}, |\bar{y}_z - \bar{y}_{z-1}| \leq 0.10\text{m}, \\ |\bar{r}_z - \bar{r}_{z-1}| &\leq 0.05\text{m} \end{aligned} \quad (8)$$

ここに、 $\bar{x}_z$, $\bar{y}_z$, $\bar{r}_z$ は繰返し計算 z ステップ目の劣化箇所同定結果（それぞれ、水平距離、深さ、半径）を意味する。上式を満たす場合、 k 番目の劣化箇所の同定結果が確定し、次の劣化箇所の同定に移る。ここでは便宜的に 0.1m と設定しているが、得られた結果（同定過程）より、式(7)は複数の劣化箇所を順次同定していくという役割を十分果たしていると考えられる。

次のステップとして、前ステップで同定された劣化箇所が既知であるとして、次の劣化箇所の同定を行う。手順としては、1 つ目の劣化箇所同定時と同じであるが、 N_{eff} を計算し、設定した閾値よりも大きな値が得られる場合、同定を終了させる。図-9, 10, 11 の全てにおいて $N_{eff} < 30$ となり、地盤内に劣化箇所が存在すると判定された。その後の同定手順は前ステップと同じであり、サンプル発生範囲、使用観測データ、載荷範囲を同定結果に基づいて再設定し、式(8)を満たすまで、繰返し同定を行う。同定パラメータが収束後（式(8)を満たした後）、再び N_{eff} を計算する。その結果、全ての計算ケースにおいて $N_{eff} > 30$ となり、地盤内にさらなる劣化箇所が存在しないと判定され、同定が終了する。

図-9, 10, 11 から明らかなように、想定した 2 つの劣化箇所の位置と範囲が精度良く同定されていることがわかる。改良フローでの計算手順は煩雑になり、計算負荷も増大するが、同定結果の信頼性という観点からは、従来法よりも有効な方法であると考えられる。また、一樣乱数を

用いた同定では、どちらも 2 つの劣化箇所を精度よく同定することができたが、乱数の種による影響が懸念される。そのような場合、種の影響を受けない超一樣分布列を用いることで、安定性の高い同定結果が得られると考えられる。

本研究では、比較的単純な条件の下で数値実験を行い、提案手法の有効性について検証した。ただし、本稿では一樣乱数を用いた検証を 2 回、超一樣分布列を用いた検証を 1 回しか行っていない。また、全ての計算で同じ問題（劣化箇所が 2 箇所のみ存在する）を対象としている。提案フローの信頼性を確認するためには、他の条件（劣化箇所の数や位置の変更）での検証をより多数回行う必要がある。さらに、実際の地盤構造物は弾塑性挙動を示すとともに、地盤構造物内に存在する劣化箇所は、様々な形状、剛性を有しているものと推察される。今後はさらに実地盤構造物を想定した数値実験および模型実験を実施し、提案手法の検証・改良を行っていきたいと考えている。

4. まとめ

本研究では、データ同化・PF に基づいた既存の劣化箇所同定手法を再考し、より同定精度の高い方法を提案した。とくに、地盤構造物内に複数の劣化箇所が存在する場合の同定精度の改善を試みた。さらに、その有効性について線形弾性有限要素解析を用いた数値実験を対象に検証を行った。得られた主要な結論を以下に列記する。

- 1) 著者ら²⁾が実施した数値実験でも確認されていたように、土構造物内に劣化箇所が 1 箇所のみ存在する場合、従来法により劣化箇所の位置や範囲が精度良く同定できることを再確認した。
- 2) 既存の方法を用いて複数の劣化箇所を同時に同定する場合、変位への影響が大きい劣化箇所のみが同定される傾向にあり、著者ら²⁾が実施した数値実験でも確認されていた問題点、複数の劣化箇所が存在する場合に精度良く機能しないこと、を再確認した。
- 3) 観測データへの影響度の高い劣化箇所は同定されやすいことに着目し、影響度の高いパラメータを順次同定し、同定後は確定値として扱う劣化箇所同定フローを新たに提案した。
- 4) 改良した同定フローを用いることによって、地盤構造物内に 2 つの劣化箇所が存在する条件でも、それらの位置と範囲を精度良く同定できることを数値実験により示した。

本稿では、全ての計算で同じ問題を対象としているため、提案フローの信頼性を検証するためには、他の条件（劣化箇所の数や位置の変更）での確認計算をより多数回行う必要がある。また、劣化箇所の有無を判定する基準として N_{eff} を応用できる可能性を示したが、対象とする問題固有の基準となり、絶対的な指標として用いることは困難である。実問題に適用するためには、これらの課題に取り組み、提案手法のさらなる高度化をはかる必要がある。

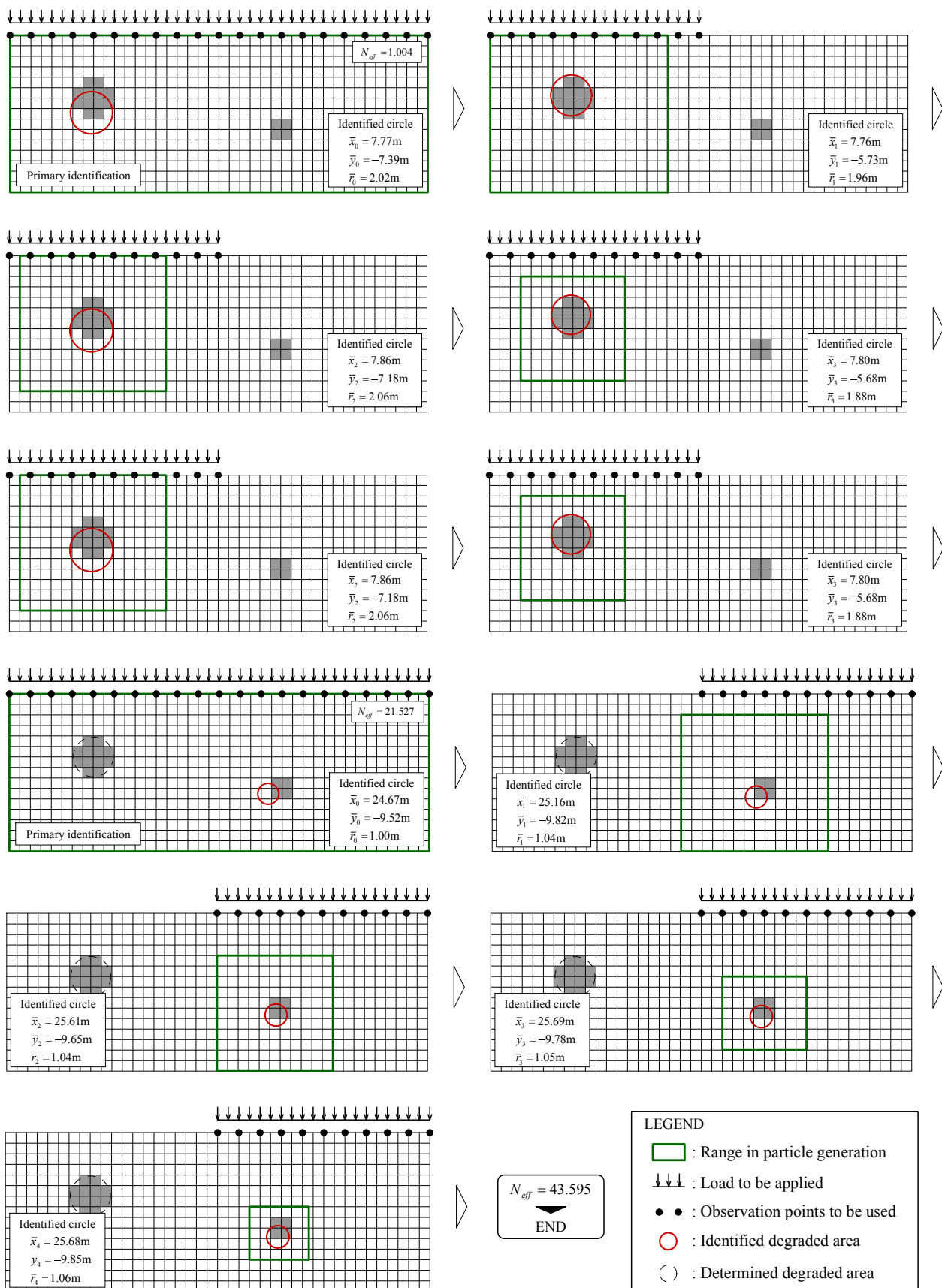


図-9 改良フローを用いた劣化箇所同定プロセス（一様乱数1）

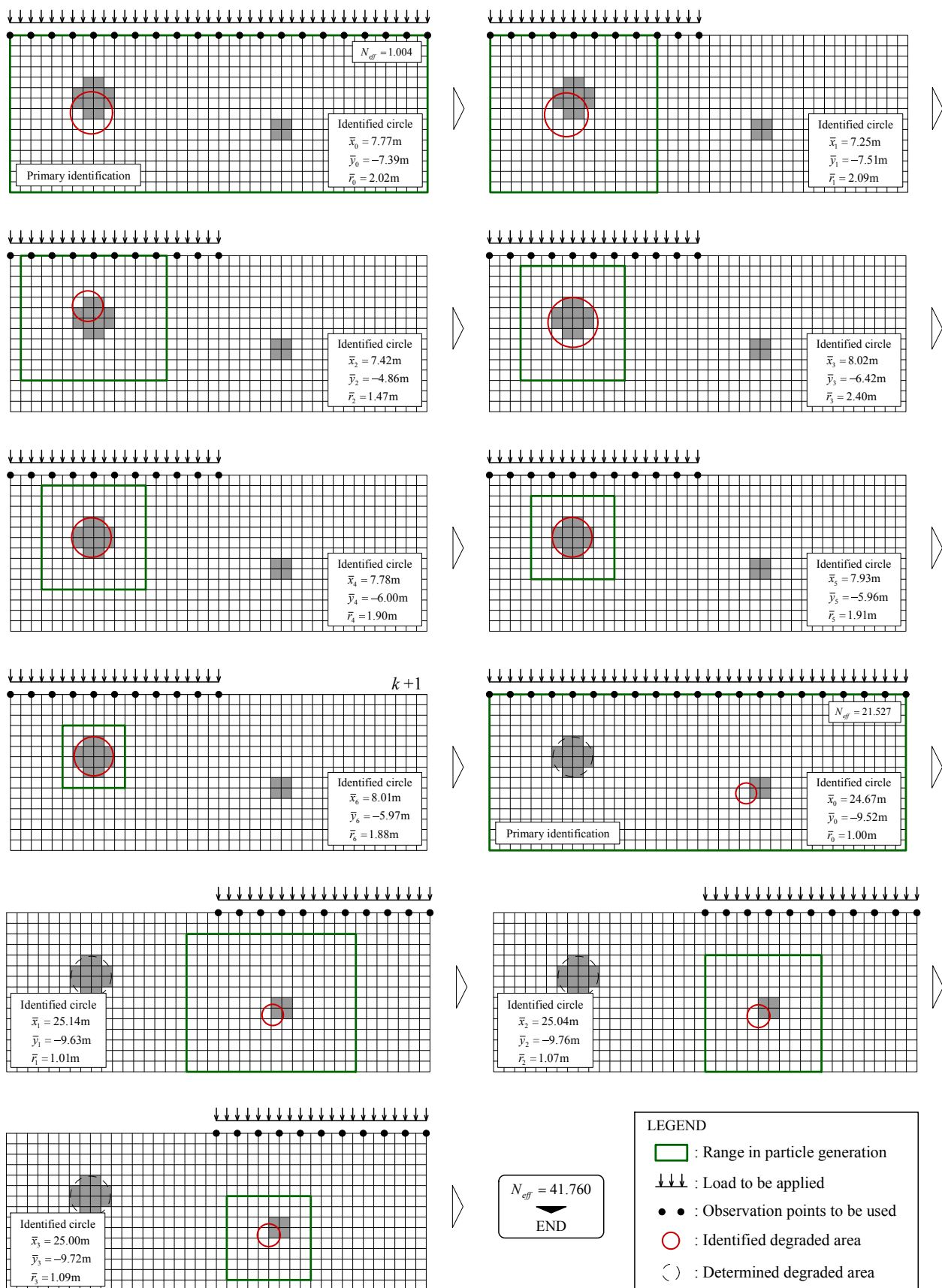


図-10 改良フローを用いた劣化箇所同定プロセス（一様乱数2）

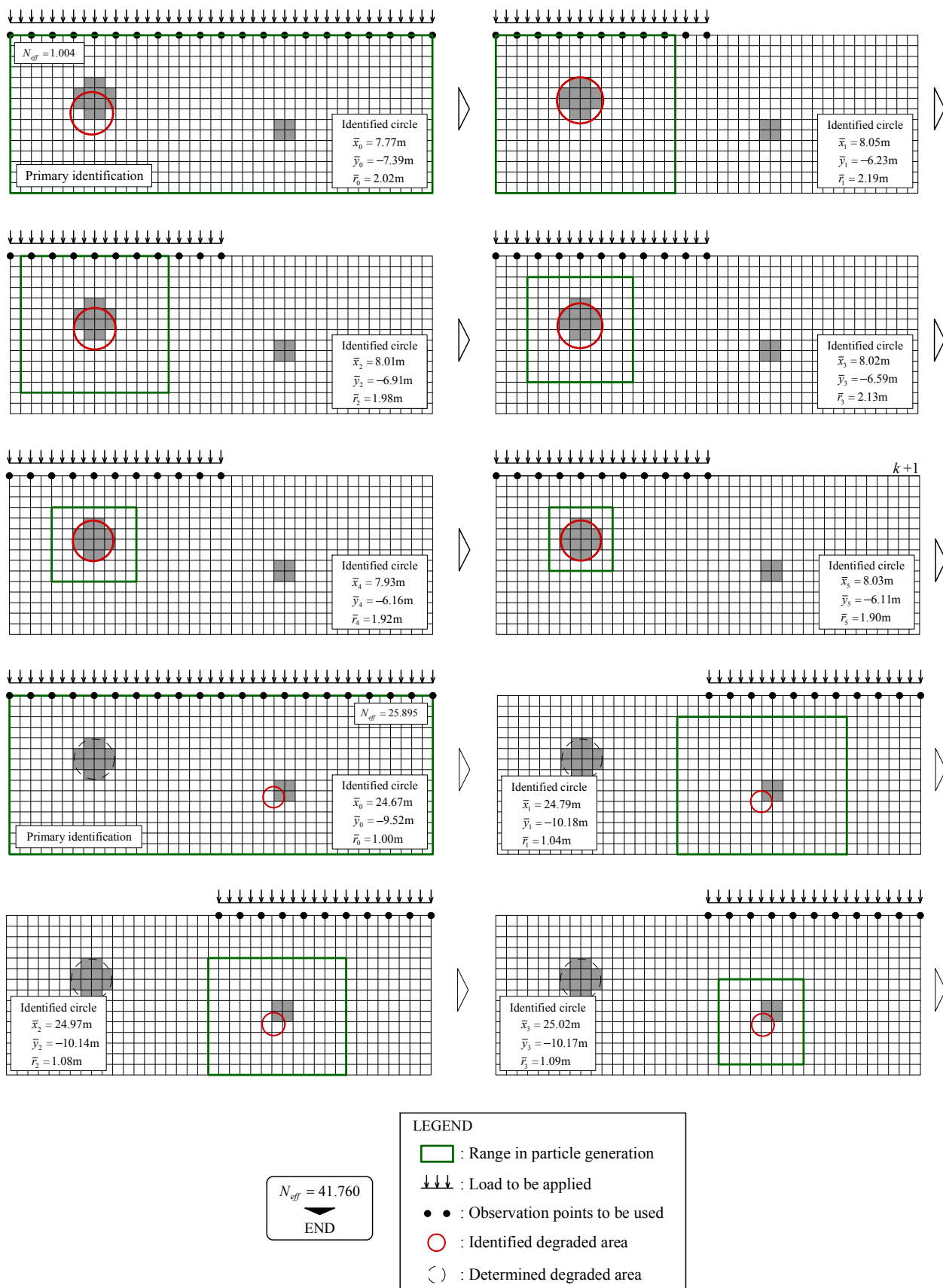


図-11 改良フローを用いた劣化箇所同定プロセス（超一様分布列）

付録A

超一様分布列¹⁸⁾の説明については割愛し、ここでは具体的な数列の構成法のみ説明する。本研究では、超一様分布列の具体的な構成法として、Halton 列を用いる。Halton 列は van der Corput 列を単純に k 次元に拡張したものである。はじめに、 $b > 1$ を整数とする。整数 $n \geq 0$ に対して $m = [\log_b n]$ ($[\]$ はガウス記号) とし、基底逆関数を

$$\phi_b(n) = \frac{a_0}{b} + \frac{a_1}{b^2} + \dots + \frac{a_m}{b^{m+1}} \quad (A1)$$

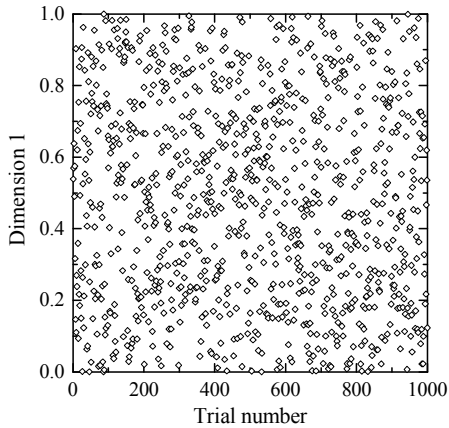
と定義する。ここで、 $a_j, j=0, 1, \dots, m$ は n の b 進展開 $n = a_0 + a_1b + \dots + a_mb_m$ における係数とすると、van der Corput 列は次のように定義される。

$$x_n = \phi_b(n), \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (A2)$$

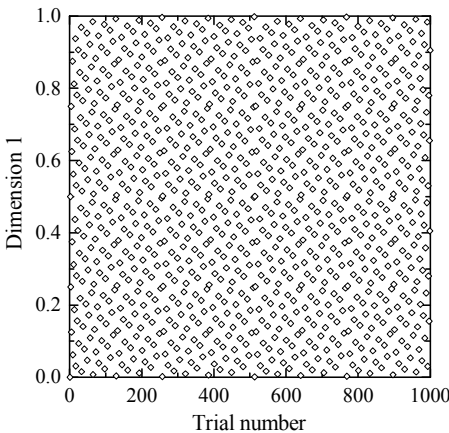
上式を基底 b の van der Corput 列と呼ぶ。また、 k 次元点列

$$X_n = (\phi_{b_1}(n), \dots, \phi_{b_k}(n)), \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (A3)$$

を Halton 列という。ここで、 $b_1, \dots, b_k$ はどの 2 つも互いに素な正整数とする。図-A1 に一様乱数と超一様分布列によるパラメータの構成例を示す。



(a) 一様乱数



(b) 超一様分布列

図-A1 パラメータの構成例

付録B

有効サンプル数は通常、粒子の「縮退 (degeneracy)」の程度を表す指標として定義されており、 N_{eff} がサンプル数 N よりも極端に小さくなる場合に、アンサンブルは縮退していると判断される。縮退の程度は、換言すれば、各サンプルの尤度の不均質さを表し、観測データに対する各サンプルの適合度が低い場合には、 N_{eff} はサンプル数 N に近い値を示す。

一方、PF による劣化箇所の同定問題を考えた場合、未検出の劣化箇所が存在しない条件下で得られた N_{eff} は、劣化箇所が存在する条件下で得られた N_{eff} よりも大きくなり、サンプル数 N に近い値を示すと考えられる。すなわち、 N_{eff} の値に着目することで、劣化箇所の存在有無を判断できる可能性がある。

以上の考察に基づき、劣化箇所の存在有無の指標として N_{eff} の閾値を決定するわけであるが、定義式 (本文中の式 (7)) から明らかなように、 N_{eff} は同定劣化箇所の位置 (観測データへの感度) や観測ノイズ、観測誤差分散の値に大きく影響される。そのため、 N_{eff} を客観的な指標として用いることができるかどうか疑問が残る。よってここでは、有効サンプル数 N_{eff} に関する数値実験結果を示すとともに、数値実験結果に基づいて N_{eff} の劣化箇所の有無を判定する指標としての適用性について考察する。

はじめに、図-B1 に示した想定劣化箇所の位置が N_{eff} に及ぼす影響を図-B2 に示す。これらは、図における番号の位置に半径 $r=2.0\text{m}$ の劣化箇所が存在するとしてパラメータ同定を実施した際の N_{eff} の変化を意味する。縦軸が N_{eff} 、横軸が計算ステップであり、凡例 A1~A9 はそれぞれ図-B2 中に示した①~⑨に対応する。また A0 は、地盤内に劣化箇所が存在しない条件下での N_{eff} の変化を示している。なお、本付録で示す全ての数値実験において、提案フロー (本文中の図-8) における一次同定と同じ計算条件とした。すなわち、超一様分布列により 256 個のサンプルを作成し計算に用いた。図に着目すると、ロードローラーは左から右へ走行するため、計算初期に多くの情報量が得られる A1~A3 の N_{eff} が急激に減少し、1 に近い値を示す。一方、地盤中に劣化箇所が存在しない A0 においても計算ステップの進行に伴い N_{eff} が減少していくものの、A1~A3 と比較してその減少傾向は緩やかであり、37step においても N_{eff} が 40 程度にとどまった。その他の結果 (A4~A9) についても N_{eff} の減少傾向は異なるものの、最終的には 1 に近い値となっている。このことは、地盤深部の小さな劣

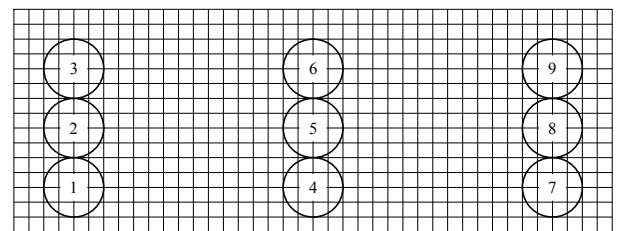


図-B1 数値実験に用いた劣化箇所の位置図

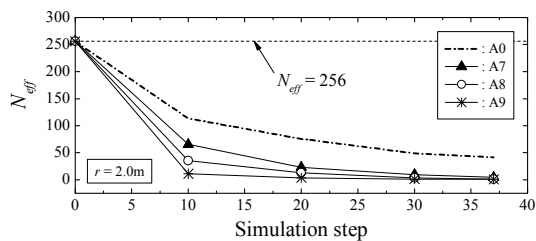
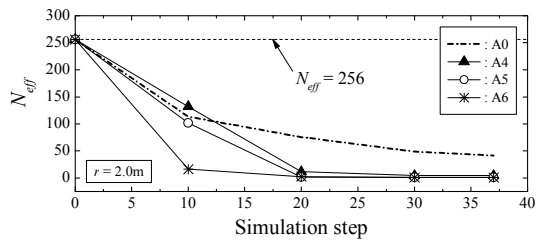
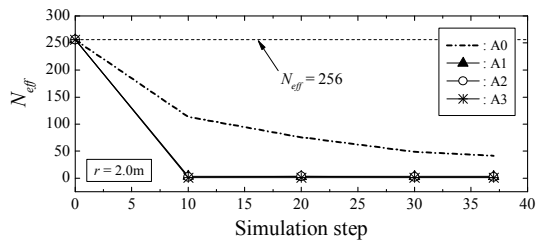


図-B2 劣化箇所の位置が N_{eff} に及ぼす影響

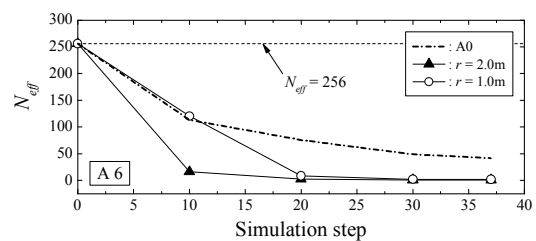
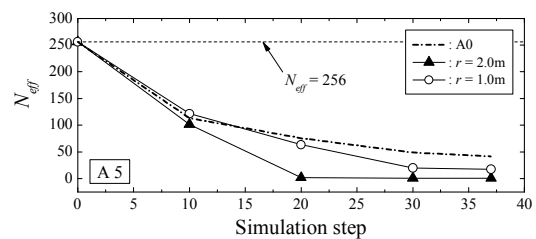
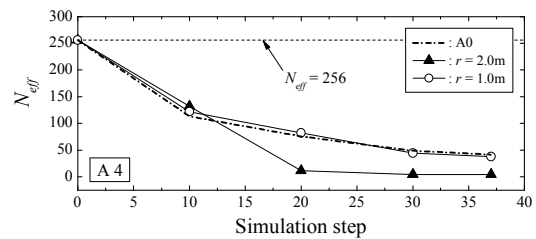


図-B3 劣化箇所の大きさが N_{eff} に及ぼす影響

化箇所を N_{eff} の値で検出することは困難であるが、地盤浅層部や大きな劣化箇所であれば、地盤内に劣化箇所が存在しない条件での N_{eff} (A0) と比較することにより、検出できることを意味する。

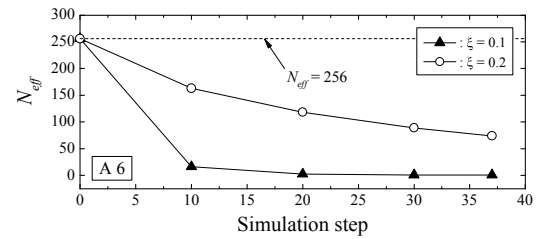
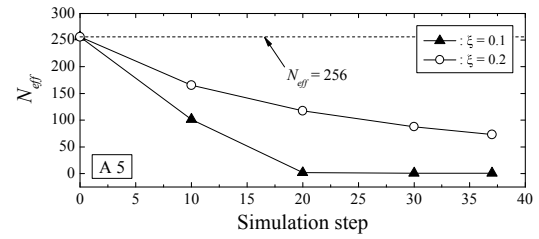
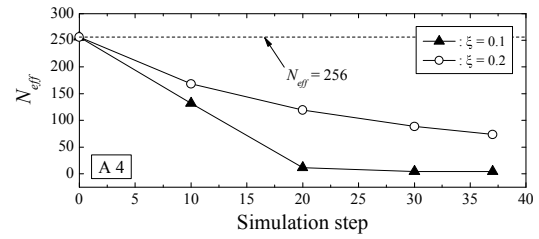


図-B4 観測誤差分散行列の違いが N_{eff} に及ぼす影響

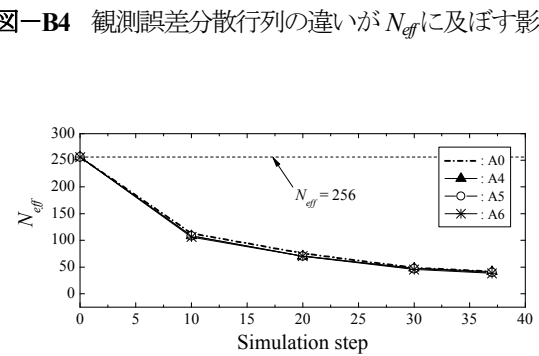
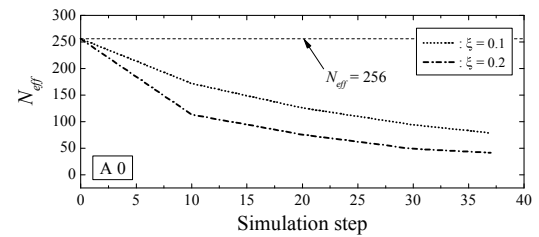


図-B5 劣化箇所を完全に同定できた場合の N_{eff}

劣化箇所の大きさ (半径 r) の違いが N_{eff} に及ぼす影響を図-B3に示す。各図中の左下に示した A4, A5, A6 は図-B1に示した劣化箇所位置を意味し、凡例の $r=2.0m$, $r=1.0m$ がそれぞれ劣化箇所の半径に対応する。図より、劣化箇所が小さい場合、計算ステップに対する N_{eff} の減少傾向が緩やかになり、最終ステップにおいても 10 以上の値を示す。浅部の劣化箇所を同定した A5, A6 の最終ステップの N_{eff} は A0 よりも小さな値を示しているが、最深部の A4 については、各ステップにおいて A0 とほぼ同様の値を示した。この結果は、深部の小規模な劣化箇所については N_{eff} によって検出できないことを意味している。

観測誤差分散行列 R_t の違いが N_{eff} に及ぼす影響を図-B4に示す。誤差分散行列の大きさは、本文中式(6)における ξ によって調整した。ここでは、 $\xi = 0.1, 0.2$ に対して計算を行った結果のみを示す。図から明らかなように、 R_t の値によって、 N_{eff} の減少傾向が大きく変化し、最終ステップにおいても100程度の値を示した。行列 R_t は観測データの信頼性を規定するものであり、その値が大きければ、重みに対する観測データの感度が小さくなる。その結果、データ同化に伴う重みの変化が緩やかになる。一方、 R_t が小さければ、重みの変化が急激になる。よって、劣化箇所同定の際には、 R_t の設定と対応した問題固有の閾値を設定する必要がある。

図-B5に、劣化箇所が存在するが、改良フローによって完全に同定された状態で計算を行った場合の N_{eff} の変化を示す。図より、劣化箇所の位置によらず N_{eff} の値はほぼ同じ値を示すことがわかる。また、同定箇所が存在しないA0ともほぼ一致する。この結果から、地盤内に劣化箇所が存在したとしても、精度よく同定した後であれば、 N_{eff} に関して劣化箇所が存在しない条件として扱うことができると考えられる。

以上の数値実験結果から、

- 1) 地盤深部の小さな劣化箇所を N_{eff} の値で検出することは困難であるが、地盤浅層部や大きな劣化箇所であれば、地盤内に劣化箇所が存在しない条件での N_{eff} (A0)と比較することにより、検出できる可能性がある。
- 2) 分散行列 R_t の値によって、 N_{eff} が大きく変動するため、劣化箇所同定中は分散行列 R_t を変えず、同じ値を用い続ける必要がある。また、 N_{eff} の閾値は対象とする問題ごとに値を設定し、 R_t を変えた場合、閾値も変化させる必要がある。

ことがわかる。

以上を踏まえ、劣化箇所有無の判定に用いる閾値として、A0の最終ステップの N_{eff} (=41.501)に基づいて、30と設定する。数値実験の結果からも N_{eff} を劣化箇所有無の一般性のある指標として用いることは困難であるが、対象とする問題をある程度限定することで、劣化箇所有無の目安として利用できる可能性がある。

参考文献

- 1) Foster, M., Fell, R. and Spannagle, M.: The statistics of embankment dam failures and accidents, *Can. Geotech. J.*, Vol.37, pp1000-1024, 2000.
- 2) 西村伸一, 亀谷 聡, 珠玖隆行, 藤澤和謙: 粒子フィルタを用いた盛土の劣化箇所同定, JCOSSAR 2011 論文集, pp.777-782, 2011.
- 3) 中村和幸, 上野玄太, 樋口知之: データ同化: その概念と計算アルゴリズム, 統計数理, Vol.53, No.2, pp.211-229, 2005.
- 4) Gordon, N. J., Salmond, D. J. and Smith, A. F. M.: Novel

approach to nonlinear/non-Gaussian Bayesian state estimation, *IEE Proceedings-F*, 140(2), pp.107-113, 1993.

- 5) Kitagawa, G., "Monte Carlo filter and smoother for non-Gaussian nonlinear state space models." *Journal of Computational Graphical Statistics*, 5(1): 1-25, 1996.
- 6) Evensen, G.: Sequential data assimilation with a nonlinear quasi-geostrophic model using Monte Carlo methods to forecast error statistics, *Journal of Geophysical Research*, Vol.99(C5), pp.10143-10162, 1994.
- 7) 佐藤忠信, 梶啓介: モンテカルロフィルタを用いた構造同定, 土木学会論文集, No.675/I-55, pp.161-170, 2001.
- 8) 佐藤忠信, 田中庸平: モンテカルロフィルタを用いた効率的構造同定法の開発とその適用, 土木学会論文集A, Vol.62, No.3, pp.693-701, 2006.
- 9) 吉田郁政, 佐藤忠信: 適応型モンテカルロフィルタを用いた損傷同定について, 土木学会論文集, No.759/I-67, pp.259-269, 2004.
- 10) 吉田郁政, 秋山充良, 鈴木修一, 山上雅人: Sequential Monte Carlo Simulation を用いた維持管理のための信頼性評価手法, 土木学会論文集 A, Vol.65, pp.758-775, 2009.
- 11) 吉田郁政, 本城勇介, 秋山充良: SMCS を用いた既設構造物のための信頼性解析の問題点と精度評価, 応用力学論文集, Vol.12, pp.79-88, 2009.
- 12) 吉田郁政, 鈴木修一, 秋山充良: SMCS を用いた RC 構造物劣化度逆推定のための塩化物イオン濃度計測誤差のモデル化, 応用力学論文集, Vol.13, pp.79-88, 2010.
- 13) 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.
- 14) 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.67-77, 2010.
- 15) 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.
- 16) Shuku, T., Murakami, A., Nishimura, S., Fujisawa, K. and Nakamura, K.: Parameter identification for Cam-clay model in partial loading model test using the particle filter, *Soils and Foundations*, Vol.52, No.2, pp.279-298, 2012.
- 17) 樋口知之, 上野玄太, 中野慎也, 吉田 亮: データ同化入門 - 次世代のシミュレーション技術 -, 朝倉書店, pp.101-115, 2011.
- 18) 手塚 集: 超一様分布列の数理, 計算統計 I/確率計算の新しい手法, 岩波書店, pp.65-120, 2003.
- 19) Arulampalam, S., Maskell, S., Gordon, N. and Clapp, T.: A tutorial on Particle Filters for Online Nonlinear/Non-Gaussian Bayesian Tracking, *IEE transactions on signal processing*, Vol.50. No.2, pp.174-188, 2002.

(2012年3月8日 受付)