

# 粒子フィルタと弾性波探査シミュレーションによる地盤パラメータの推定

## Identification of Material Parameters of the Ground

### Using Particle Filter and Elastic Wave Simulation

○古川 智大\*, 高松 亮佑\*, 村上 章\*, 中畑 和之\*\*, 藤澤 和謙\*

Tomohiro Furukawa, Ryosuke Takamatsu, Akira Murakami, Kazuyuki Nakahata, Kazunori Fujisawa

#### 1. 背景

ダムやため池などの土構造物や農業用施設を建設する際、地中に空洞などの欠陥があると工事の大きな妨げになることがある。本研究では粒子フィルタと弾性波探査シミュレーションを組み合わせることで、地中に存在する欠陥の位置や特性を推定することを目的とした。

#### 2. 欠陥部の同定方法

弾性波探査シミュレーションでは、構造物内部に存在する物性の異なる境界で散乱された弾性波を地表面の受信機によって記録する。弾性波の伝播解析では、波動方程式を時間領域と空間領域で差分化し、その差分式を時間ステップごとに逐次計算することで対象領域内の波動場が求められる。具体的には有限積分法により支配方程式を微小領域で積分した後、離散化を行った<sup>1)</sup>。本研究では図1のような地中の欠陥部を円形と仮定した解析モデルを用い、その結果を粒子フィルタ<sup>2) 3)</sup>に適用して欠陥部のパラメータを推定した。本解析では、入力時間が0.5秒、中心周波数が10kHzのリッカー波<sup>4)</sup>を入力波として用いた。欠陥箇所の同定手順を以下に示す。

1. 地盤中の欠陥を円形で密度のあるものと想定し、求めるパラメータを中心位置  $x$ ,  $y$ , 半径  $r$ , 密度  $d$  の4つとした。図1のように1m間隔で受信機と送信機を地表に設置し、モデルの両端は吸収境界とした。また、地盤の密度は  $0.267 \times 10^4 \text{kg/m}^3$  とした。
2. 粒子フィルタに用いる実現値 (= 粒子の数) を500とし、表1に示す所定の範囲内で一様乱数に従って作成した。
3. 弾性波探査シミュレーションによって各受信機で得られる散乱された弾性波の水平速度を求めた。
4. 弾性波探査シミュレーションの結果を粒子フィルタに適用し、想定した欠陥に対する各粒子の尤度を計算した。
5. 各粒子の値と重み分布をもとに重み付き平均を計算し、それを各パラメータの推定値とした。

Case 1 では空洞を仮定し、Case 2 では岩のような密度のある異物が存在すると仮定し

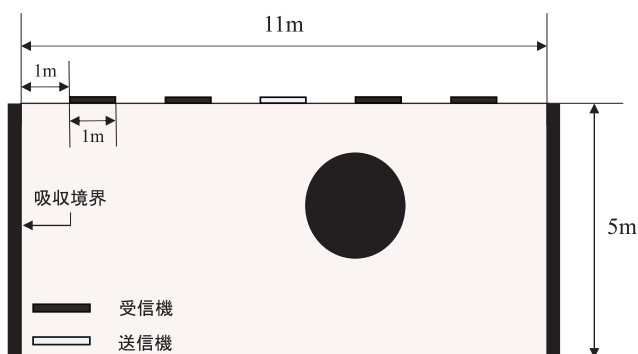


図1 解析モデル  
Fig.1 Model description

表1 粒子の範囲  
Table 1 Range of value

Case	1	2
$x$ の範囲 (m)	1.50~9.50	1.50~9.50
$y$ の範囲 (m)	1.50~3.50	1.50~3.50
$r$ の範囲 (m)	0.50~1.50	0.50~1.50
$d$ の範囲 ( $10^4 \text{kg/m}^3$ )	—	0.20~0.35

\*京都大学大学院 農学研究科 \*\*愛媛大学大学院 理工学研究科

\*Graduate School of Agriculture, Kyoto University \*\*Graduate School of Science and Engineering, Ehime University

**Keywords:** 土構造物の解析, 逆解析, 数値解析

て解析を行った。すなわち、Case 2ではCase 1と同様に欠陥箇所の中心位置  $x$ ,  $y$ , 半径  $r$  に加えて欠陥の密度  $d$  も同時に推定した。

### 3. 解析結果

Case 1, 2 における推定値と想定値と合わせて表 2 に、想定した欠陥箇所と推定による欠陥の位置の比較を図 2 にそれぞれ示す。図 2 中の点線が想定箇所、実線が推定箇所を表す。また、図 2(a)が Case 1 の結果、図 2(b)が Case 2 の結果である。Case 1 では  $x$  と  $r$  について推定値と真値が大きくかけ離れた結果となり正しく推定はできなかった。一方、Case 2 では半径は多少小さいが高精度、中心位置はかなりの高精度で推定された。また、密度  $d$  も高精度で推定された。したがって、地中に異物が存在するとき、空洞があると仮定するよりも異物があると仮定して弾性波探査シミュレーションおよび粒子フィルタを適用すると、かなり高い精度で推定結果を得られることが分かった。

### 4. まとめと考察

実際に異物が地中に存在するときそれを空洞と仮定して推定を行うと、真値とは全く異なる推定結果となった。そこで、異物が存在すると仮定して推定を行うと、高い精度で推定できた。これは、弾性波探査シミュレーションにおいて空洞と密度のある物質で異なる条件をもとに計算されるためと考えられる。また、表 2 や図 2(b)で示した推定結果から、弾性波探査シミュレーションと粒子フィルタを組み合わせた手法には感度を優先するパラメータが存在すると思われる。本研究で感度が高かったのは中心位置パラメータの  $x$ ,  $y$  であった。これは、粒子フィルタの推定精度は初めに生成する粒子がどれだけ想定値に近い値を持っているかに依存するため、全パラメータで同時に想定値に近い値を持っていないければ感度よく推定できるパラメータが限られることに起因する。仮に生成した粒子のうち 1 つでも全パラメータで想定値に極めて近い値を持つとき、推定精度は極めて高くなると考えられる。このため、用いる粒子数を増やすと計算とシミュレーションにかかる時間は増えるが、より高精度で推定できると考えられる。しかし、本研究は地中に欠陥が存在すると分かっている前提で行ったため、実際に用いるとするとまずは地中に空洞などの欠陥があるか、あるならそれがどういった欠陥であるかを判別しなければならない。今後は地中の事前情報を一切持ち合わせていない状態から本研究の適用に至るまでの方法を研究する。また、欠陥を同時に複数箇所推定できるかについても研究していきたい。

### 参考文献

- 1) 中畑和之, 木本和志, 廣瀬壯一: 動弾性有限積分法を用いた波動伝搬解析のためのイメージベースモデリング, 計算数理工学論文集, Vol.7, No.2, pp.267-272. 2008.
- 2) 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.
- 3) 片山 徹, 非線形カルマンフィルタ, 朝倉書店, pp.142-152, 2011.
- 4) 小田島淳, 中畑和之, 北原道弘: 位相の反転・非反転現象に着目した欠陥による後方散乱波形解析, 境界要素法論文集, Vol.18, pp.23-28, 2001.

表 2 想定値と解析結果

Table 2 True value and results of analysis

Case	真値	Case 1	Case 2
中心位置 $x$ (m)	7.00	5.08	6.96
中心位置 $y$ (m)	2.00	2.37	1.96
半径 $r$ (m)	1.000	0.245	0.761
密度 $d$ ( $10^4\text{kg/m}^3$ )	0.300	—	0.328

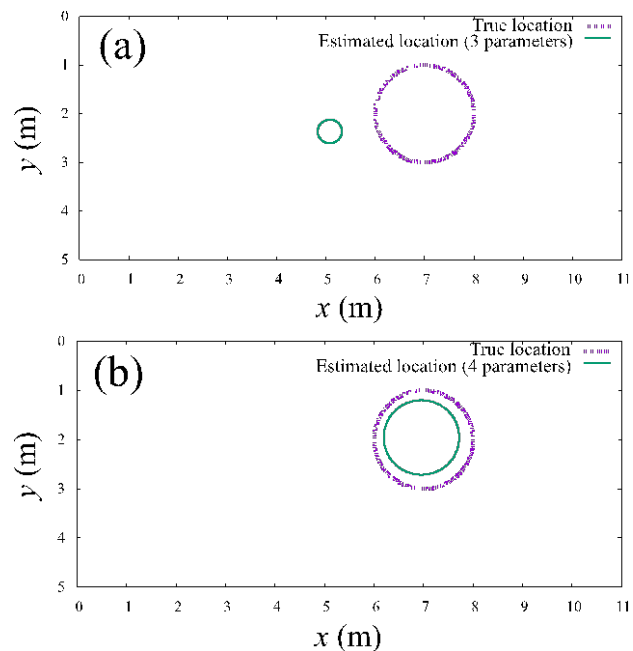


図 2 真の位置と推定位置の比較

Fig.2 Comparison with true and estimated location