

(84) 3次元測量データを活用した地層構造の逆解析手法の構築に向けた基礎的研究

宮原 悟¹・財津駿平²・松浦 敦²・小林泰三³

¹ 非会員 立命館大学院 理工学研究科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)

E-mail: rd0077xe@ed.ritsumei.ac.jp

² 非会員 伊藤忠テクノソリューションズ株式会社 (〒141-8522 東京都品川区大崎 1-2-2)

³ 正会員 立命館大学 理工学部 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)

E-mail: kobat@fc.ritsumei.ac.jp

本研究では、地表面の変位観測から地盤の層厚構造を推定する逆解析手法の提案に向けた基礎的な机上検討を行った。従来、逆解析は点の観測データに基づいて行われることが多いが、3次元測量によって得られた面的・空間的な観測データを用いて推定の信頼性や精度向上を実現しようとするものである。本報では、その基礎的研究として、完全弾性体と仮定した水平成層（多層）地盤の地表面に荷重を作用させたときの地盤の沈下問題（平面ひずみ問題）を例題とし、地表面の多点変位観測から地盤の層厚構造の逆推定を解析的に試みた。その結果、推定精度には観測点の設置条件が大きく影響するものの、その解の安定性を評価することで、適切な観測条件の抽出と精度の良い層厚推定が実現できる可能性のあることを示すことができた。

Key Words: ICT, 3D topographic survey, Inverse analysis, FEM

1. はじめに

地盤断面図は、ボーリングデータに基づいて作成されるのが一般的であるが、データがないところは推定によらざるを得ないため、不確実性がつきまとう。例えば図-1は、盛土施工が予定されている軟弱地盤（実地盤）の地盤断面図であるが、盛土の挙動予測が地層境界線の描き方に大きな影響を受けることは想像に難くない。著者らは、建設現場で普及が進む UAV やレーザスキャナなどによる3次元測量技術に着目し、これらを観測ツール

とした逆解析手法が提案できないかと考えている。これらの3次元測量を同一現場に対して時期をずらして実施すると、差分解析を経て、その間に発生した地形の変状を精緻かつ3次的に把握することができるようになる。従来は、点の観測データに基づく逆解析が行われてきたが、適用できる場面が限られたり、問題を単純化しないと解けない場合^{1,2)}が少なくない。3次元測量によって得られた面的・空間的な観測データを用いることで、パラメータの推定精度向上や、推定できるパラメータの種類や数などを増やせる可能性がある。本報では、その基礎的研究として、荷重载荷による地盤の沈下問題を例題に、広域・多点計測による地層の層厚逆推定に関する机上検討を行った。

2. 市販の解析ソフトウェアを利用した逆解析プログラムの実装

逆解析には直接定式化法と逆定式化法があるが³⁾、一般によく用いられる直接定式化法では、未知パラメータを仮定して順解析を行い、その解析結果と実現場での観測値の誤差がより小さくなるように未知パラメータを修正して再計算を行う。このプロセスを繰り返すことで誤差

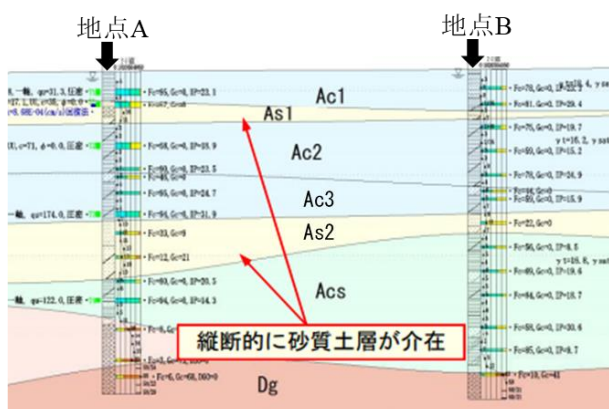


図-1 砂と粘土が互層する軟弱地盤の地盤断面図

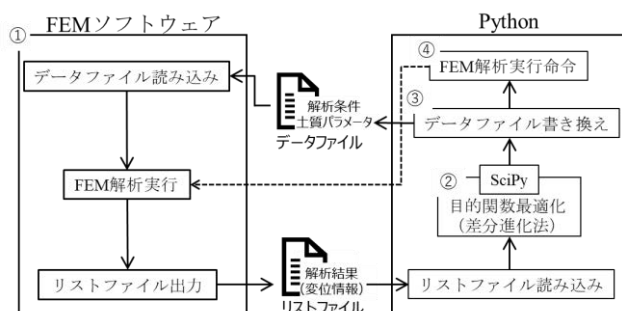


図-2 市販のFEMソフトを利用した逆解析プログラム

が最小になるような未知パラメータを推定する。観測値と解析結果の誤差を目的関数とすると、逆解析（直接定式化法）は、目的関数を最小化するパラメータの最適化問題といえることができる。

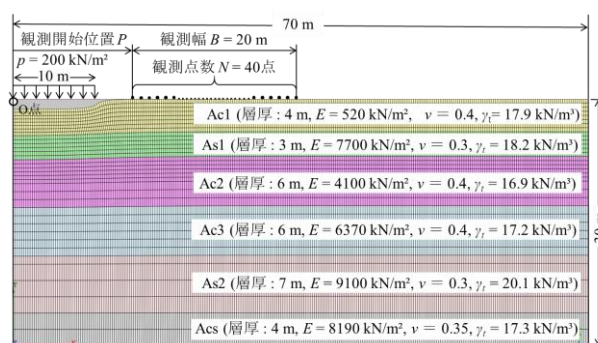
本研究では、市販の有限要素解析ソフトウェア（伊藤忠テクノソリューションズ社 Soil Plus Static：以降、FEMソフトと呼ぶ）とフリーのプログラミング言語 Python を組み合わせた逆解析プログラムを構築した（図-2）。

FEM ソフトは、メッシュ情報や荷重・境界条件、土質パラメータなど、解析条件が記述されたデータファイルを読み込み、FEM 解析を実行した後、地盤の変位情報など、解析結果が記述されたリストファイルを出力する（図-2の①）。出力されたリストファイルを Python が読み込み、最適化によって土質パラメータを修正・更新する（同図②）とともに、データファイル内の土質パラメータを書き換える（同図③）。最適化が終了するまで、FEM解析を自動的に繰り返す命令を Python から出す（同図④）。なお、最適化には、Python の数値計算ライブラリである SciPy を用いた（本研究では、微分情報を必要としない差分進化法⁴⁾を選択した）。

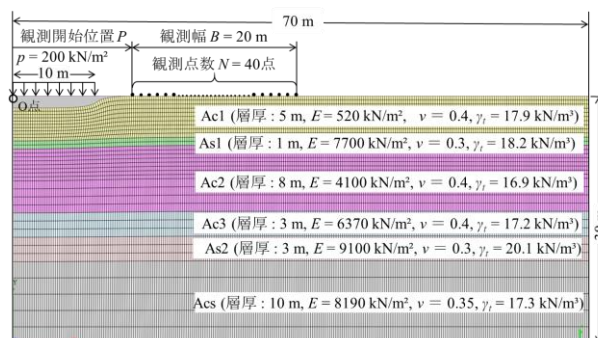
以上の通り、逆解析を実装するためにコーディングしたのは、ファイルの読み込み／書き換え、最適化実行、FEM 解析実行の 3 つの命令文のみであり、既存の FEM ソフトや数値計算ライブラリを組み合わせることによって簡単に逆解析が実装できるようになる。

3. 解析モデルと解析条件

実現場の観測データを用いた逆解析が実践できると良いが、多点観測による推定精度向上の可能性を理論的に確認するために、本研究では解析上で観測値を再現して層厚の逆推定を行った。本報では、簡単な例題として、完全弾性体と仮定した水平成層（多層）地盤を設定し、地表面に等分布荷重を作用させたときの地盤の沈下問題（平面ひずみ問題）を考え、載荷領域周辺の地表面の変位観測から地盤各層の層厚を推定する。



(a) 地点Aの地層構造に基づく正解モデル



(b) 地点Bの地層構造に基づく正解モデル

図-3 解析モデルと観測条件

本報では、図-1に示した地盤断面図の地点Aと地点Bの実地盤情報に基づいて、図-3に示すような仮想地盤を正解モデルとすることにした。すなわち、図-3(a)は、地点Aの地層構造に基づいて再現された2次元水平成層地盤（水平幅140m、深さ30m）であり、図-3(b)は、地点Bの地層構造に基づくものである。問題が線対称であることに鑑みて、図-3に示すように半断面で解析を行った。各層の土質パラメータ（弾性定数 E 、ポアソン比 ν 、単位体積重量 γ ）は同地点のボーリング・土質試験で得られた値を用いた（図-3中に記載）。

ここでは、図-3の正解モデルに対して、地表面中央に 200 kN/m^2 の鉛直等分布荷重（幅20m）を加え、それによって生じる地表面の水平・鉛直方向の合成変位を観測値（正解）とする。逆解析では、同じ載荷条件のもと、各層の層厚を修正・変更させて繰り返し解析を行う。地表面に設置した各観測点の解析結果と前述の正解値の二乗和誤差が所定の精度に収まるまで層厚の修正・更新を繰り返す。本研究では水平成層地盤を仮定しており、ここで推定（最適化）するのは各層の層厚のみである。層厚最適化の分解能は FEM で設定した 1 メッシュ厚とした。

4. 解析結果と考察

(1) 観測点数が少ない場合の逆解析

従来の逆解析や観測施工では、トータルステーションなどを用いた「点」の観測が行われることが多く、観測点数が限定されることが多い。ここではまず、限られた観測点数での逆解析の適用性を確認するため、地点Aの解析モデル(図-3(a))を用いて、O点から0, 10, 20 mの水平距離にある地表面3点を観測点として逆解析を行った。その結果、逆推定された層厚は、Ac1 : 4.5 m (相対誤差 : 12.5%) , As1 : 2 m (-33.3%) , Ac2 : 0.5 m (-91.7%) , Ac3 : 0.5 m (-91.7%) , As2 : 20.5 m (192.9%) , As2 : 2 m (-50.0%) となった。いずれの層も正解値に対する誤差が大きく、冒頭に述べたように、観測点数が少ない場合には精度の高い推定が困難となることが分かる。地点Bの解析モデル(図-3(b))についても同じ3点の観測点で逆解析を行ったが、地点Aと同様に高い推定精度は得られなかった。

(2) 観測点数を増やした場合の逆解析

続いて、地表面の観測点数を増やした場合について検討を行った。ここでは、観測条件としてO点から最も近い観測点までの水平距離を観測開始位置 P 、観測点の存在する範囲を観測幅 B とする(図-3参照)。また、観測幅 B の区間に等間隔に観測点を設置し、その観測点数を N とする。本研究では、観測条件 P 、 B 、 N を種々変化させ逆解析を行ったが、紙面の都合上、以下では、観測幅と観測点数を $B = 20$ m、 $N = 40$ 点で固定し、観測開始位置 P のみを変化させた場合の結果について述べる。

図-4は、観測開始位置 P を0~15mの範囲で変化させたときの層厚推定値を柱状図として示したものである。地点A(図-4(a))、地点B(図-4(b))ともに、正解に対して上位にあるAc1, As1, Ac2層は比較的良好で安定した推定結果が得られたが、下位にあるAc3, As2, Acs

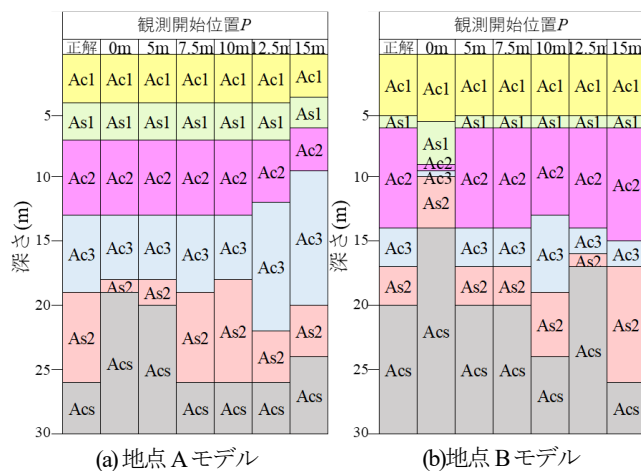


図-4 層厚推定結果の一例

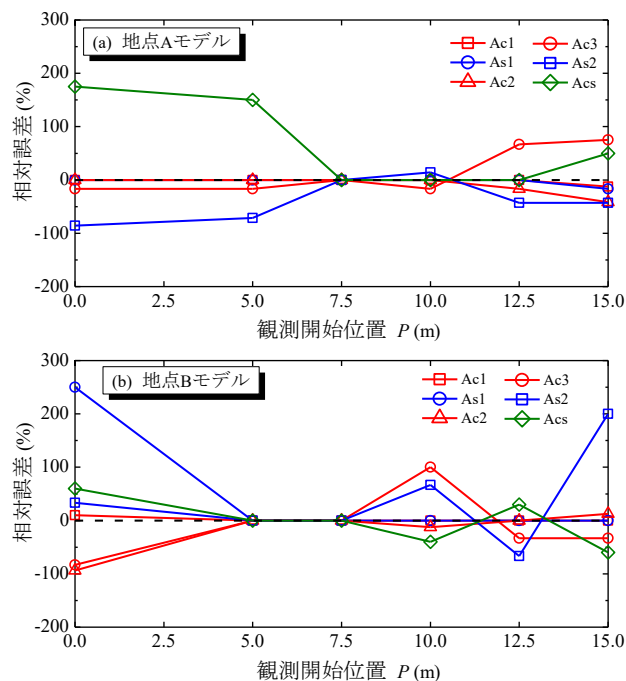


図-5 観測条件が層厚推定精度に及ぼす影響

層の推定値は P の条件によって大きく変動した。下位層になると地表面の沈下に及ぼす影響が相対的に小さくなり、重根が存在することを示唆している。

図-5は、各層の層厚正解値に対する推定値の相対誤差を表したものである。この図から、観測開始位置 P の条件によって推定精度は大きくばらついているが、地点Aモデル(図-5(a))では $P=7.5$ m、 10 mのとき、地点Bモデル(図-5(b))では $P=5.0$ m、 7.5 mのときに全層で精度の高い推定ができていることが分かる。この結果は、適切な観測条件のもとで逆解析を行えば、精度の高い層厚推定が実現できることを示唆している。

5. 最適な観測条件の特定方法

正解(真値)の分からない現場では、前章で行ったような推定値と正解値の比較が行えないため、最適な観測条件を事前に知ることはできない。そこで、本章では、正解が不明の場合に推定値の精度や信頼性を向上させる方法について検討する。

前述したように、観測条件が不適切であるとき、重根が存在して解が安定しない。本研究ではこのことを逆に利用して、不適切な条件を含む様々な観測条件で逆解析を行った上で、その解の安定性から最適な観測条件を見出すことができるのではないかと考えた。UAVやレーザスキャナによる3次元測量では、広域・多点の観測データが得られ、その中から観測条件(P , B , N)を事後かつ任意に抽出・設定することができる。

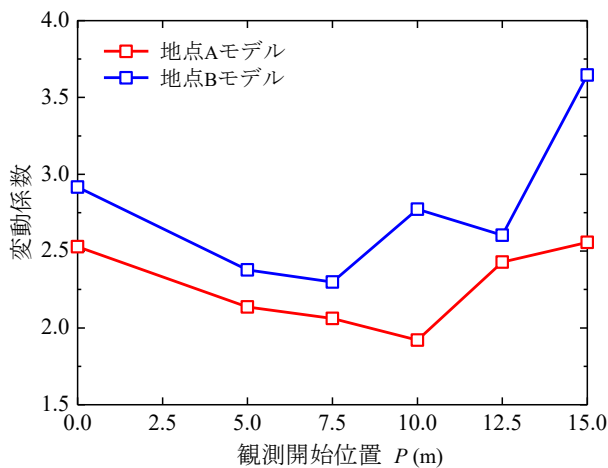


図-6 観測条件による層厚推定値のばらつき

表-1 最適な観測条件での層厚推定値の平均値

層	地点 A モデル ($P=10$ m)		地点 B モデル ($P=7.5$ m)	
	正解値 (m)	推定値 (m)	正解値 (m)	推定値 (m)
Ac1	4.0	3.90	5.0	5.05
As1	3.0	2.75	1.0	1.25
Ac2	6.0	6.85	8.0	7.80
Ac3	6.0	4.50	3.0	2.40
As2	7.0	6.40	3.0	5.20
Acs	4.0	5.60	10	8.30

ここでは、4章と同様に観測幅を $B=20$ m、観測点数を $N=40$ 点で固定し、観測開始位置 P を $0\sim15$ m の範囲で変化させて解の安定性を評価する。なお、推定結果は逆解析（最適化）を行う際の初期値に依存するため、それぞれの観測条件につき、層厚初期値を変更して 10 回の逆解析を行った。

図-6 は、10 回の逆解析によって得られた Ac1～Acs 各層の層厚推定値の変動係数の総和（6 層分）が観測条件 P によってどのように変動したのかを示したものである。この図から、地点 A モデルでは $P=10$ m、地点 B モデルでは $P=7.5$ m のときに変動係数（各層の解のばらつき）が小さくなっていることが分かる。すなわち、この条件を解析結果とする逆解析を行えば、不要な観測データを回避し、最良の層厚推定結果が得られるように考えられる。最適な観測条件で得られた各層の層厚推定値の平均値を表-1 に示す。正解値と完全には一致

していないが、同手法によって、ある程度良好な推定が行えていることが分かる。

ここでは、各層の変動係数の総和が最も小さくなる観測条件を探索したが、前述したように、深度が深くなると地表面変状への影響度は小さくなると考えられる。地盤変状への影響度に応じて層の変動係数に重み付けをするなど、更なる精度向上に向けて、最適な観測条件の探索方法には工夫の余地があると考えている。

6. おわりに

本研究では、完全弾性体を仮定した水平多層地盤の荷重载荷による沈下問題を例題とし、地表面の変位観測から層厚の逆推定を試みた。その結果、推定精度には、地表面に設置する観測点の設置条件が大きく影響するものの、最適化の初期値を変更して多数の逆解析を行い、解の安定性を評価することで、最適な観測条件を特定し、推定精度向上が実現できる可能性があることが分かった。UAV やレーザスキャナによる広域・多点の観測データは、観測後に必要なデータのみを任意に抽出することができるため、提案手法への適用性は高いと考えられる。本研究では、地盤を弾性体と仮定した簡単なモデルで検証を行ったが、今後は、より実態に即した地盤構造や構成モデルによる理論検証や実現場における実証研究を進めていきたいと考えている。

参考文献

- 1) 植田康宏, 山上拓男, 森 国夫, 安富秀樹: テールアルメ盛土斜面の逆解析を活用した適用事例, 土木学会第 46 回年次学術講演会, pp.760-761, 1991.
- 2) 脇田英治: 逆解析の理論と応用, 技報堂出版, pp.138-140, 2000.
- 3) 桜井春輔: 情報化施工における逆解析, 土木学会論文集, No. 652/III-51, pp.1-10, 2000.
- 4) Storm, R. and Price, K.: Differential Evolution - a Simple and Efficient Heuristic for Global Optimization over Continuous Spaces, *Journal of Global Optimization*, 11, pp.341-359, 1997.