

I-424

連続・離散最適化手法による地盤の逆解析

(株)地崎工業 正会員 ○須藤 敦史
武蔵工業大学 正会員 星谷 勝

1. はじめに

地盤工学分野において逆解析とは、解析領域全体とその内部の部分領域の存在および境界条件を既知としたときの土質定数（ヤング率やポアソン比）を求めることである。この問題では、まず最初に解析対象を設定して、目的関数値を最小とするような未知数を求める。これは、パラメータ推定問題であり基本的には非線形の最小二乗問題になる。これを解く方法として、対象が土質定数等の連続値であるため、Gauss-Newton法やKalman Filter(勾配法)が適している。とくに後者は確率理論を背景とし、観測誤差の考慮が行えるため、近年最も頻繁に利用されている。本研究では、拡張Kalman Filterのアルゴリズムを基本とした拡張Kalman Filter重み付きローカルな繰り返し法に有限要素法を組み込んだEK-WLI-FEM¹⁾と離散型最適化手法である修正インポートランス・サンプリング法²⁾を組み合わせ、システム中の離散的要素と連続的要素を同時に推定して、システム全体の最適化を行う手法に対する基礎検討を行った。

2. 連続・離散最適化手法の組み合わせ

EK-WLI-FEMでは地盤物性値を変位量の観測値に基づいて推定する。従って、対象とする地盤等は有限要素法で空間離散化を行うため、地質や地層の構成はあらかじめ把握していなければならない。しかし、実際の解析では、数少ない情報（ボーリングデータ等）しかない場合が多く、解析中に層構成等を推定する必要がある。そこで層構成や層の数は離散量となるため、修正インポートランス・サンプリング法で推定し、物性値をEK-WLI-FEMで推定する。

本手法の手順を図-1に示す。図に示すように、地盤の領域を修正インポートランス・サンプリング法で最適化していき、EK-WLI-FEMでは、地盤領域の物性値（ヤング率）を逆解析により求める。その際の評価関数は、観測変位と推定した領域・物性値による解析変位との差を用いている。また、修正インポートランス・サンプリング法における領域縮小操作の基準は、次に示す通りとした。

1) 以下に示す目的関数が平均値より大きい(変位差が大きい)場合

$$Z = \sum_{i=1}^N (y_i - y_i^*)^2$$

 y_i^* : 観測変位

 y_i : 解析変位

 N : 観測点数

2) EK-WLI-FEMを用いた際に収束計算が収束していない場合

3. 数値解析例

まず、図-2に示す解析モデル(1)において土柱は何層で構成されているか、また各層の弾性係数はいくつであるかという問題を検討する。つまり地盤の領域の最適化とその物性値の逆解析を実行して、本手法の有効性を検証する。図-2は、土柱を80個の要素に分割した有限要素モデルである。図に示されているように10 tonfの荷重が、鉛直方向に作用している。基本モデルは3層からなり、弾性係数は上層から $E = 1000 \text{ tonf/m}^2$, 1500 tonf/m^2 , 2000 tonf/m^2 , ポアソン比0.3とし、2次元平面歪問題として節点変位を計算した。そして、図中の●印を付けた4点の鉛直変位を観測データに採用した。

この問題では弾性係数 E を状態ベクトルの要素として表現している。同定すべき量は修正インポートランス・サンプリング法によって決

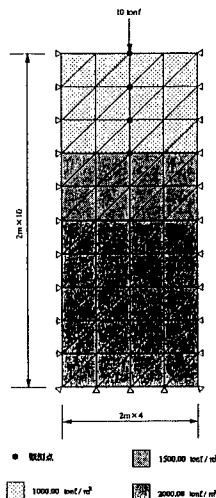


図-2 解析モデル(1)

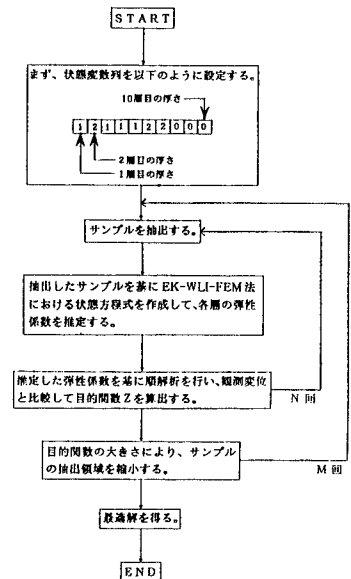


図-1 連続・離散量の最適化手順

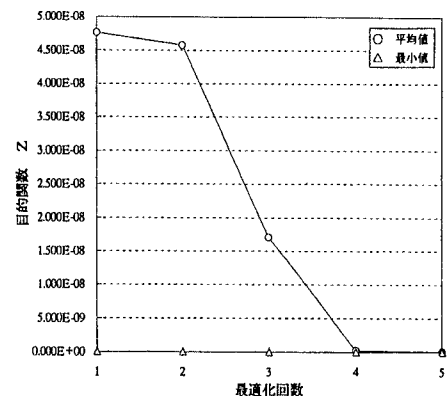


図-3 目的関数値(1)

定し、それによって状態方程式を作成する。この後は、初期値を 1000 tonf/m^2 としてEK-WLI-FEMにおいて10回の繰返し計算を行う。ここで、隣接する層において同定された値が近い（差が 50 tonf/m^2 以内）場合には、1つの層として計算をやり直す。また、乱数により層の厚さが0になった場合には、厚さが0の層より下にある層の層番号を1つずつ繰り上げる。そしてEK-WLI-FEMで同定した値により順解析を行い、順解析変位と観測変位との差を求めて評価関数とする。これにより、地盤における離散的要素（層厚）と連続的要素（物性値）の両要素の最適化を行う。

解析は、解候補数 $20 \cdot$ 減少数4とし、最適化の計算は5回（領域の縮小4回）、縮小以前の領域における再抽出は解候補の10%として行った。また図-2より、EK-WLI-FEMにおいて同定すべき量は10までとなる制約条件が設定される。解析結果を図-3、4に示す。図-3より、目的関数値は一樣に減少している。また図-4より、設定した解が得られた。

次に、地盤は土柱の集まりであると仮定して図-5に示す解析モデル(2)を用いて、領域の最適化と物性値の推定を行った。解析手順は基礎モデルと変わらないが、今解析では状態変数列が著しく長くなる。そこで、地盤というのは層をなして積み重なっていくものであるということ、解析精度を要求する問題ではないので制約条件として地盤物性値が4種類以下であると設定した。

解析は、図-5において●印を付けた6点の鉛直変位を観測変位に採用して行った。そして、解候補数50、減少数を5、最適化の計算は10回（領域の縮小9回）、縮小以前の領域における再抽出は解候補の10%とした。また、EK-WLI-FEMにおいては初期値を 2000 tonf/m^2 とし、15回の繰返し計算を行った。本解析でも、隣接する層において同定された値どうしが近い（差が 50 tonf/m^2 以内）場合には、1つの層として計算をやり直す。なお今回は、土柱によっては厚さが1以上の層と層の間に、厚さが0という層が存在する。解析結果を図-6に示す。図-6より、目的関数値は一樣に減少していることが分かる。また、推定された地盤を図-7に示す。図-7より解析モデルに近い地盤状態を推定することが出来ている。そして、地中の塊状な層が存在しているという情報も得ることが出来た。しかし、計算の10ステップ目で探索領域が縮小しきってしまい、これ以上解析モデルに近い地盤状態を推定することは難しい。これは、目的関数の関数曲面がかなり複雑であることやコンピュータにおける計算精度によるものと思われる。

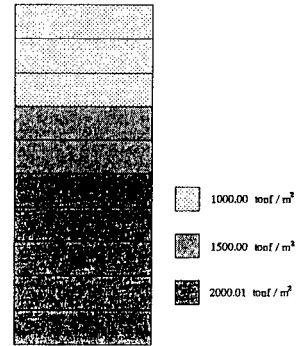


図-4 逆解析結果（1）

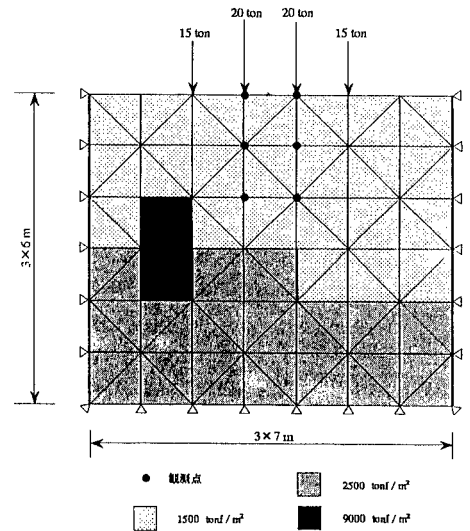


図-5 解析モデル（2）

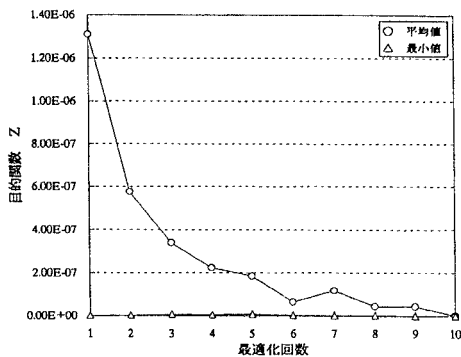


図-6 目的関数値（2）

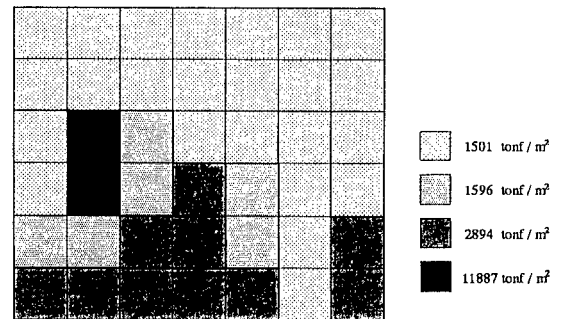


図-7 逆解析結果（2）

参考文献

- 1) 須藤敦史・星谷 勝: 拡張カルマンフィルタの基本的考察とEK-WLI法の提案, 土木学会論文集, No.437, pp.203-211, 1991.
- 2) 須藤敦史・星谷 勝: 修正インポートランス・サンプリングによる離散変数の最適化, 第44回応用力学連合講演会, PP.413-414, 1995.