

大阪府立大学農学部 学生員 ○松 下 良 司*

同 上 正 員 小 山 修 平

同 上 正 員 桑 原 孝 雄

1. はじめに 近接施工を余儀なくされる大都市の浅深度地下空間において、情報化施工に必要な周辺地盤の地盤定数推定法には、従来、FEM逆解析法が数多く提案されている。しかし、地盤、特に岩盤は多数のクラックや節理などの不連続部を有し、連続体モデルであるFEMでは適切なモデル化を行うことができない。この不連続性を考慮した解析法には、ジョイント要素を用いたFEM解析や、不連続体モデルである剛体ばねモデル(RBSM)¹⁾、個別要素法(DEM)それに不連続変形法(DDA)²⁾等が提案されているが、それらを用いた逆解析法が確立されているわけではない。そこで、本研究では、岩盤の不連続性をFEMより適切に表現できるRBSMと拡張カルマンフィルタ³⁾を結合させ、現場計測結果である観測変位より、周辺地盤の地盤定数(ヤング率、ポアソン比)を推定する逆解析法を開発・提案する。本方法の適用例として、すべりを生じた地下空間、特に近接構造物を有する地下空間を想定し、周辺地盤の地盤定数を推定した結果について述べる。

2. 拡張カルマンフィルタRBSM弾性逆解析法 本方法は、周辺地盤を等質等方の弾性体と仮定し、二次元平面ひずみ問題において、現場計測結果である観測変位から周辺地盤のヤング率(E)とポアソン比(ν)を推定する逆解析法である。図1にフローチャートを示す。解析モデルにすべり等の不連続性を的確に表現できるRBSMを採用し、統計的推定法の一つである拡張カルマンフィルタを適用することにより推定を行う。収束の判定には、各観測点での観測変位と計算変位との差の二乗和を定義した誤差関数を用い、その誤差関数が最小となる点を収束点と判断し、その点における地盤定数の値を推定値として採用した。また、観測点の取り扱い方についてであるが、RBSMではFEMと異なり要素自身が剛体であることから、FEM逆解析のように節点と観測点を一致させると、剛体回転角の値により水平および垂直変位のみで観測変位を取り扱うと誤差が生じる。そこで、本逆解析法では、観測点となる位置に2節点だけで構成される境界用要素を配置し、その中点に自由度を設定し、この自由度設定位置を観測点とすることにより、剛体回転角に関係なく、水平および垂直変位のみで観測変位が取り扱えるよう配慮した。

3. 本逆解析法の検証 本方法の検証を行うために、図2に示す等質地盤である簡単な地下空間をモデル化し、弾性解析解を観測変位とし逆解析を行う。観測変位にトンネル下部A点および上部B点での垂直変位を用いる。弾性解析

に用いたヤング率およびポアソン比は $E = 5000 \text{ tf/m}^2$ 、 $\nu = 0.3$ である。推定状況を図3に示すが、誤差関数が減少し良い収束性を示しており、推定値も $E = 4955 \text{ tf/m}^2$ 、 $\nu = 0.304$ と真値($E = 5000 \text{ tf/m}^2$ 、 $\nu = 0.3$)との誤差は1%前後であり、また観測変位と確認変位の差がほとんどないことから、本逆解析法は妥当であると判断できた。

4. すべりを生じた地下空間における地盤定数の推定 すべりを生じた地下空間へ本方法を適用した結果について示す。対象とする地下空間は、 $40\text{m} \times 30\text{m}$ の等質等方の地盤領域に半径5mの円形トンネルが中央に存在するモデルである。観測変位はトンネル下部および上部における垂直変位と、右側部、左側部の水

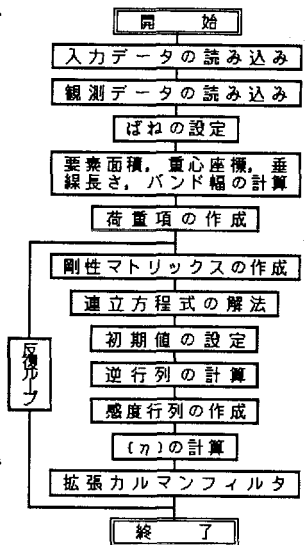


図1 逆解析フローチャート

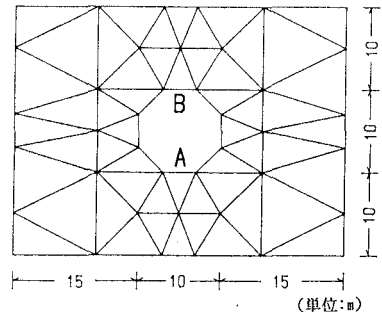


図2 要素分割及び観測点[検証モデル]

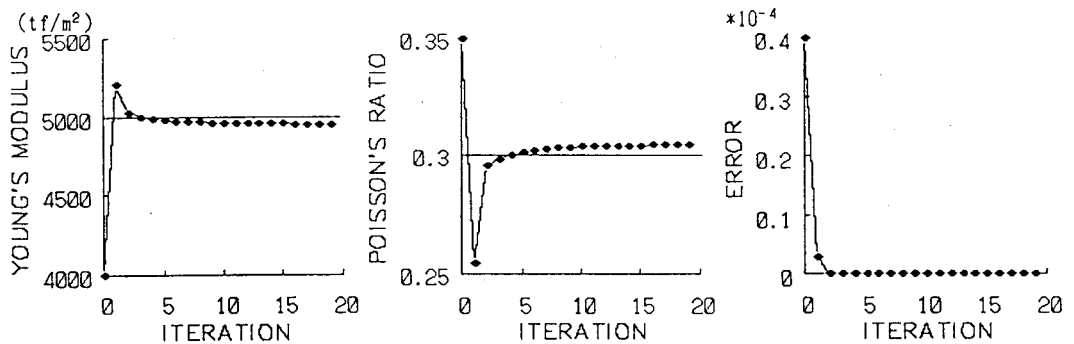


図3 推定状況[検証モデル]

平変位の4変位とする。この観測変位にはRBSM弾塑性解析解を用いる。表1 ヤング率推定結果(単位:tf/m²)

弾塑性解析に用いた地盤定数は、 $E=5000\text{tf/m}^2$ 、 $\nu=0.3$ であり、Mohr-Coulombの降伏条件を採用した。すべり線の発達状況より4段階に分け、すべりの少ない順にCASE1~4とし、その時点での観測点における変位を観測変位として採用し本方法により地盤定数を推定する。一般にポアソン比は解に与える影響が少ないことが確かめられており、ここでもポアソン比を0.3と仮定しヤング率のみを推定する。

等質 モデル	解析値	推定値	
		RBSM	FEM
CASE 1	5000	4816	3857
CASE 2		4556	3665
CASE 3		4435	3571
CASE 4		4232	3422

それぞれのケースにおける推定値を表1に示す。CASE1,2,3およびCASE4とすべりが発達するにつれ、ヤング率が低下する傾向にある。つまり、すべりの発達により強度低下が起こる結果となった。ここで、本方法の有用性を示すために、従来法であるFEM逆解析法における推定値との比較を行う。最小化手法には、本方法と同じ拡張カルマンフィルタを用いる。上述のモデル、観測変位を用いて拡張カルマンフィルタFEMで推定した結果を表1に同時に示す。RBSM逆解析法と同様、すべりの発達によりヤング率は低下する推定結果となったが、推定値の値はRBSM逆解析法より小さくなっている。これはRBSM逆解析結果よりも一見安全側となるようであるが、すべり等の不連続性をうまく表現できず、必要以上の強度低下を示したと考えられる。本来、情報化施工では、逆解析により推定したヤング率を用いて再び順解析を行い変位や応力等の計算値と実測値を比較することにより施工管理が行われるので、ヤング率の大小よりも、いかにすべり等の不連続性を考慮できるかが重要となる。その点、RBSM逆解析法はFEM逆解析よりも的確にすべりを表現し、その結果、より合理的な推定値を与え、逆解析手法としての有用性を示していると言える。

5. 近接構造物を有する地下空間への適用 近接構造物を有する地下空間へ本方法を適用した結果について述べる。対象モデルは、 $100\text{m}\times70\text{m}$ の等質地盤に半径5mの円形トンネルが水平方向に並んで存在するモデルであり、一方のトンネルを既設構造物と考え、そのトンネルに観測点を設定し、観測変位としてRBSM弾塑性解析解を採用し、本方法により周辺地盤の地盤定数を推定する。ここでもポアソン比は0.3と仮定する。その結果、弾塑性解析に用いたヤング率が 20000tf/m^2 であるのに対し、推定ヤング率は 18535tf/m^2 と低下を示した。これもすべりによる強度低下が要因と考えられる。このように計測環境のよい既設構造物の観測変位より周辺地盤の巨視的なヤング率が推定でき、新設構造物の挙動予測への応用の可能性を示した。

6. 結論 岩盤の不連続性を表現できるRBSMを用いた新しい地盤定数推定法を提案したが、模擬データながら、すべりを生じた地下空間へ適用することにより、本方法の妥当性の検証とともに、すべりによる周辺地盤の地盤定数低下を推定することができた。今後の課題として、現場計測変位との対応性、異方性力学モデルの導入、三次元問題並びに要素内変形を考慮したDDA型逆解析等への拡張性の検討が必要である。

<引用および参考文献> 1)川井忠彦・竹内則雄:“離散化極限解析プログラミング”,培風館,1990 2)大西有三・佐々木猛:“不連続変形法(DDA)とその岩盤工学への適用について”,第24回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集,pp.296-300,1992 3)村瀬治比古・小山修平・石田良平:“順・逆解析入門”,森北出版,1990