

地山掘削変位を用いた逆解析による 地質境界面同定の適用性確認

The applicability study of geologic boundary surface identification
by inverse analysis using ground excavation displacement

鎌田浩基¹⁾, 山本真哉²⁾, 青野泰久³⁾, 多田浩幸⁴⁾, 櫻井英行⁵⁾

Hiroki Kamada, Shinya Yamamoto, Yasuhisa Aono, Hiroyuki Tada, Hideyuki Sakurai

- 1) 修士(工)清水建設(株)技術研究所 (〒135-8530 東京都江東区越中島3-4-17, E-mail: hiroki.kamada@shimz.co.jp)
- 2) 博士(工)清水建設(株)技術研究所 (〒135-8530 東京都江東区越中島3-4-17, E-mail: s-yama@shimz.co.jp)
- 3) 修士(工)清水建設(株)技術研究所 (〒135-8530 東京都江東区越中島3-4-17, E-mail: y.aono@shimz.co.jp)
- 4) 博士(工)清水建設(株)技術研究所 (〒135-8530 東京都江東区越中島3-4-17, E-mail: tada_h@shimz.co.jp)
- 5) 博士(工)清水建設(株)技術研究所 (〒135-8530 東京都江東区越中島3-4-17, E-mail: hideyuki.sakurai@shimz.co.jp)

This study confirms the applicable conditions under three-dimensional conditions for the problem of geologic boundary identification by inverse analysis using ground excavation displacement. In order to conduct a fundamental study, the observed data were generated by numerical analysis, and a linear elastic material model was assigned. Assuming that the geologic boundary is planar, identification experiments were conducted for several correct solutions. As a result, it was confirmed that the identification accuracy varied greatly depending on the position and angle of the geologic boundary surface of the correct solution.

Key Words : Inverse Analysis, Geological Boundary Surface, Excavation Analysis

1. はじめに

トンネルなどの地下構造物の施工時において、施工箇所の観察結果や変位計測結果、地山探査技術、数値解析などを用いて事前設計の妥当性を評価し、対策を講じることで、より安全かつ合理的、経済的な設計・施工を目指す情報化施工が行われている。

このトンネル情報化施工では、掘削により崩落などの危険を生じうる軟弱層や断層破砕帯の分布を突入前に把握し、対策を講じることが重要である。これにより、支保や施工法を検討することができ、地山挙動把握のための解析モデル更新へと役立てることも可能である。

掘削対象地山の地質調査は、施工前の文献調査やボーリング調査、地質踏査、弾性波探査などにより行われる。近年、施工中における地質調査技術が多くの建設現場で採用されるようになり、削孔エネルギーや弾性波探査を用い、地質分布を把握しようとする試みが増えている。これらの技術は、調査箇所の現実に即した地質性状の把握が可能であり、地山の地質状況を知るために効果的である。一方で、調査箇所の部分的な硬軟の影響を受ける可能性があり、工期やコストの観点から高頻度での実施も困難である。

地下構造物の施工時には、日常的な施工管理として地山の掘削変位計測を行う。これにより得られる変位は平均的に見た地山の地質状況を反映していると考えられる。そこで計測変位と数値シミュレーションを組み合わせたデータ同化などの逆解析手法を用いることにより、部分的な地質性状に左右されず、より平均的な地質性状を推

定することが可能と考えられる。ただし、この手法では、実際の地質分布と差異を生じ易いことが想定されるため、前述のような調査手法と併用し、複合的に解釈することが重要であることを強調しておく。

これまで、トンネルの計測変位を用いた地山物性の同定解析に関する研究が多く行われており[1]~[5]、近年は計算機性能の向上により、三次元掘削解析モデルを用いた同定解析や、計測誤差やモデル誤差を考慮可能なデータ同化解析に関する報告がされている[6]。その一方、地質分布や地質境界面を逆解析により同定することを試みた研究は少なく[7]~[9]、現実的なオーダーの計測誤差や変位を用いた場合の適用範囲を調べたものは見当たらない。

本研究は、地山の平均的な性状を表しうるトンネル壁面の計測変位を観測データとして用い、地質境界面を逆解析により同定する手法の構築と適用性を確認することが目的である。また、構築した最適化手法の検証のために、観測データは正解のモデルを用いた数値解析により作成し、現実的なオーダーの誤差を付与した。また、いくつかの正解の地質分布に対して、同定実験を実施し、ケースごとに正解の地質境界面との誤差を定量化することで、適用範囲の確認を行った。

2. 数値解析手法

本節では、地質境界面を同定するための最適化問題の設定を行う。

(1) 地質境界面のモデル化

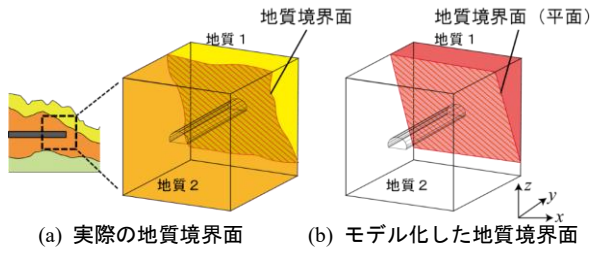


図-1 地質分布と地質境界面

実際の地質は、図-1(a)に示すように、地殻変動や堆積過程により湾曲していることが一般的である。

本研究では、図-1(b)に示すように物性の異なる二種類の地質1, 2が存在し、その地質境界面が平面であると仮定して、以下のような数式で表現する。

$$ax + by + cz + d = 0 \quad (1)$$

ただし、式(1)は両辺の定数倍により、同じ平面に対して無限通りの定数の組み合わせを取りうる。本研究では、最適化問題を解くことで式(1)の係数を同定するため、解に一意性を持たせることが必要であることから、 $c=1$ とした。この場合、 $c=0$ となる平面を表現できないため、本研究の検討ではそのような解が予想される観測データを用いないことにする。また、式(1)の係数に関する理解のしやすさのため、平面が座標軸となす角度を用いて $a = \tan \theta$ 、 $b = \tan \omega$ と置き換えると、

$$(\tan \theta)x + (\tan \omega)y + z + d = 0 \quad (2)$$

のように表現可能である。

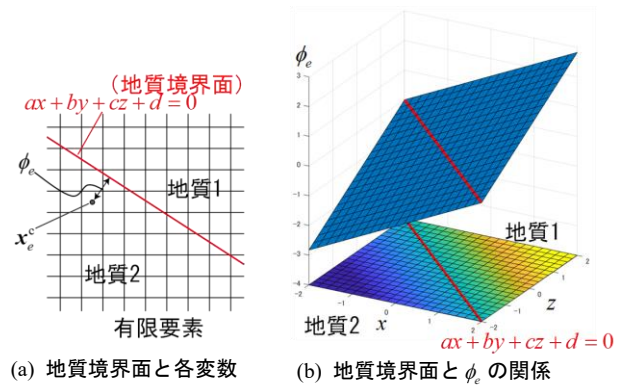
(2) 最適化問題における不連続性の緩和

パラメータ同定のための最適化問題における目的関数は、観測変位と解析変位との誤差ノルムであり、その最小化問題を考える。勾配法に基づく最適化アルゴリズムによりこれを解き、地質境界面の方程式における係数(設計変数、同定変数)を同定するためには、目的関数が設計変数に対して連続で微分可能であることが必要である。そこで本研究では、文献[7]を参考に、地質境界面の両側で物性が連続的に変化するように地質物性値の不連続性の緩和を行う。以下では、一般性を考慮して式(1)に基づいて定式化を行うが、式(2)を用いた場合も同様である。

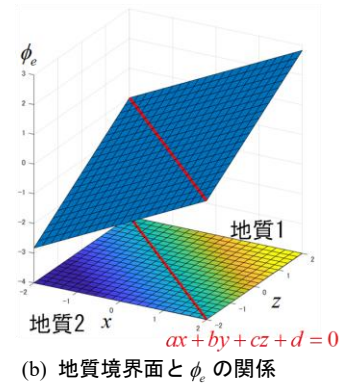
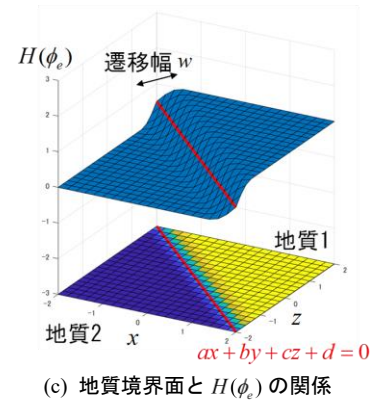
まず、数値解析における有限要素の中心座標 $\mathbf{x}_e^c = (x_e^c, y_e^c, z_e^c)$ と地質境界面との符号付き距離(レベルセット関数)は、以下のように表される。

$$\phi_e = \frac{ax_e^c + by_e^c + cz_e^c + d}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}} \quad (3)$$

なお、地質境界面の方程式、有限要素の中心座標 \mathbf{x}_e^c 、符号付き距離 ϕ_e はそれぞれ図-2(a)の通りである。



(a) 地質境界面と各変数

(b) 地質境界面と ϕ_e の関係(c) 地質境界面と $H(\phi_e)$ の関係図-2 地質境界面と ϕ_e 、 $H(\phi_e)$ の関係

また、地質境界面の方程式の近傍における符号付き距離 ϕ_e の分布は、図-2(b)のようになり、境界面上で $\phi_e = 0$ 、地質1の領域で $\phi_e > 0$ 、地質2の領域で $\phi_e < 0$ をとる。これを用いて、地質分布の連続なラベル関数を以下のように定義する。

$$H(\phi_e) = \begin{cases} 0 & (\phi_e < -w) \\ \frac{1}{2} + \frac{\phi_e}{2w} \left[\frac{15}{16} - \frac{\phi_e^2}{w^2} \left\{ \frac{5}{8} - \frac{3}{16} \frac{\phi_e^2}{w^2} \right\} \right] & (-w < \phi_e < w) \\ 1 & (\phi_e > w) \end{cases} \quad (4)$$

このラベル関数 $H(\phi_e)$ は、図-2(c)に示すように、 $\phi_e > 0$ のときに $H(\phi_e) = 1$ 、 $\phi_e < 0$ のときに $H(\phi_e) = 0$ へとマッピングし、遷移幅 w で滑らかに遷移するような関数である。つまり、ラベル関数が1のときにその領域は地質1の領域であり、0だと地質2の領域となるため、 $H(\phi_e)$ を用いて地質のラベル付けを行うことができる。

次に、地質物性のヤング率については、以下のような式で表現が可能である。

$$E(H(\phi_e)) = E_1(1 - H(\phi_e)) + E_2 H(\phi_e) \quad (5)$$

ただし、 E はある領域におけるヤング率、インデックス1と2は、地質1と2のヤング率に対応する。式(5)を用いた地質物性は、ラベル関数 $H(\phi_e)$ と同様に、地質境界面の両側で遷移幅 w で滑らかに遷移する関数となる。

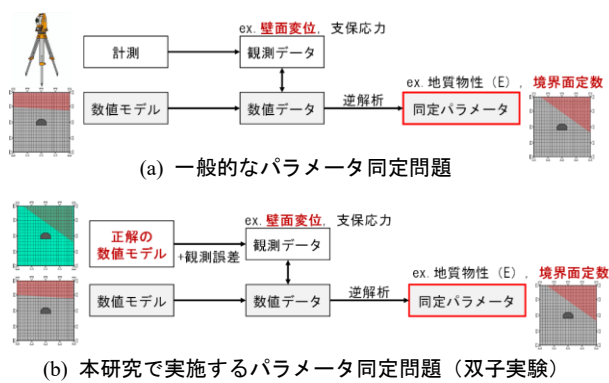


図- 3 同定問題の構成

(3) 最適化問題の設定

本項では、地質境界面同定のための最適化問題の設定を行う。本研究では以下のような目的関数の最小化問題を考える。

$$\min_x f_0 = \left\{ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(u_i^{\text{sim}} - u_i^{\text{obs}} \right)^p \right\}^{\frac{1}{p}} \tag{6}$$

subject to $Ku^{\text{sim}} = f^{\text{ext}}, \tag{7}$

$$\begin{aligned} x &= [\theta, \omega, d], \\ \theta^l &\leq \theta \leq \theta^u, \\ \omega^l &\leq \omega \leq \omega^u, \\ d^l &\leq d \leq d^u \end{aligned} \tag{8}$$

ここで、式(6)は目的関数であり、 n は変位計測点数×節点自由度数、 u_i^{sim} 、 u_i^{obs} はそれぞれシミュレーションによる解析変位と観測変位、 p はノルムのべき乗数(偶数)であり、本研究では $p=2$ を設定する。式(7)は平衡方程式で、 K は剛性行列、 f^{ext} は外力ベクトルである。式(8)は設計変数(同定パラメータ)であり、式(2)でモデル化した地質境界面の変数 θ 、 ω 、 d の三つとし、これらを同定する。ただし、設計変数には下限値と上限値を設けている。

(4) パラメータ同定問題の構成

一般的に、地下構造物施工時における岩盤のパラメータ同定問題の構成は、図- 3(a)に示すように、計測により得られるトンネル壁面変位等の観測データと、数値モデル(シミュレーション)から得られる数値データとが近づくように逆解析を行い、地質物性などのパラメータを同定する。これを本研究に当てはめると、観測データとしてトンネル壁面変位を用い、同定パラメータには地質境界面の定数 $x=[\theta, \omega, d]$ を設定することになる。ここでは、構築した最適化手法の検証のために、図- 3(b)に示すように、正解の地質境界面の定数を設定した正解の数値モデルをあらかじめ用意し、その数値解(真値)に任意の観測誤差を付与した疑似的な観測データを作成し、逆解析を実施した。このような方法を双子実験と呼び、得られた同定パラメータと正解とを比較することで、誤差の計算が

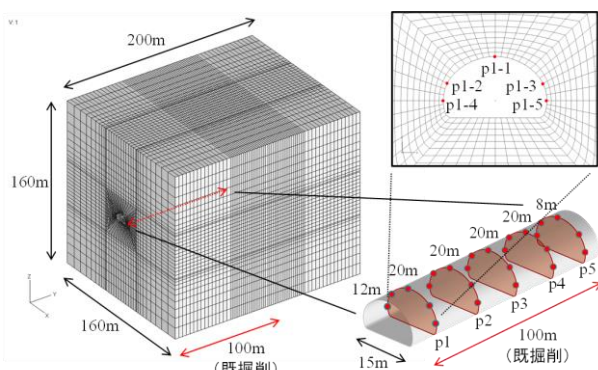


図- 4 使用した解析モデル

表- 1 動作検証に使用したパラメータ

パラメータ名	値
θ^{ans}	15 deg
ω^{ans}	5 deg
d^{ans}	-5 m
θ^{ini}	0 deg
ω^{ini}	0 deg
d^{ini}	0 m
E_1	1 GPa
E_2	3 GPa
ν	0.2
σ_{ini}	6 MPa
σ_{err}	1 mm

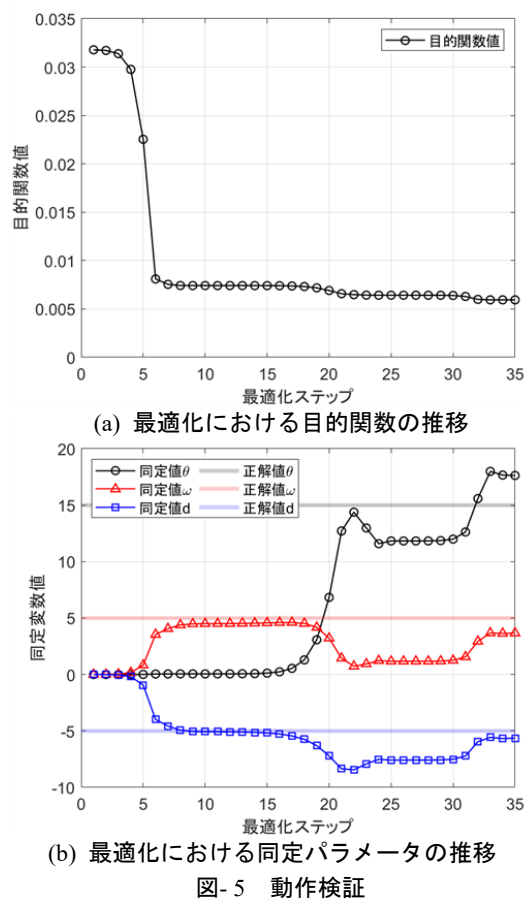
可能であるため、本研究ではこの方法を採用している。なお、観測誤差 w_{err} は、平均 0、分散 σ_{err}^2 (標準偏差 σ_{err}) の正規分布に従う乱数により生成した。

3. 地質境界面同定の誤差検証

本節では、三次元モデルを用いたトンネルの切羽(トンネル掘削最先端の掘削面)の前方に位置する、軟弱な鉛直地層との地質境界面同定の誤差検証を目的とし、いくつかの条件で同定計算を行った。

(1) 解析モデルの設定

解析モデルは、図- 4に示すメッシュを用いた。計算負荷低減を目的として、掘削部周辺のメッシュが細くなるようにしている。また、今回の問題設定では式(4)の地質ラベルが有限要素ごとに定義されるため、地質分布は有限要素単位で表現されるが、以下の検証では正解とする地質境界面を掘削部付近に設定しているため、図- 4に示すメッシュにより十分に地質分布や地質境界面を表現可能であると考えられる。境界条件は、モデル端面の法線方向を固定し、それ以外の方向は自由とした。また領域内に地山の初期地圧を初期応力として与え、掘削解析を実施した。掘削部はモデル内トンネル延長の半分である100m分を設定し、変位観測点と観測断面位置は図- 4の右側のよう



(2) 同定問題の動作検証

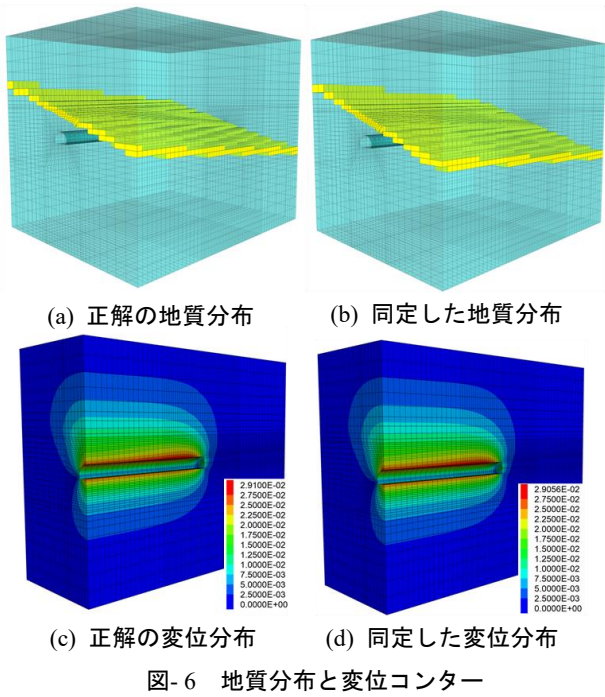
正解の地質境界面のパラメータを同定するにあたり、式(6)~(8)で設定した最適化問題が適切であるかを確認するため、動作検証を行った。使用した設定パラメータは表-1に示した。ここで、 θ^{ans} 、 ω^{ans} 、 d^{ans} は正解とする地質境界面のパラメータ（それぞれ地質境界面の x 軸からの傾き、y 軸からの傾き、z 切片の符号を反転させた値を意味する）、 θ^{ini} 、 ω^{ini} 、 d^{ini} は θ 、 ω 、 d 同定時の初期値、 E_1 、 E_2 は地質 1、2 のヤング係数、 ν は地質のポアソン比、 σ_{ini} は等方性の地山初期地圧（圧縮側を正）を表す。また、材料モデルには線形弾性体を用いた。なお、同定パラメータは θ 、 ω 、 d の三つとした。観測値の最大変位は p4-1 の z 方向変位（天端沈下）で 29.0 mm である。また真の変位に与えた観測誤差の統計量 σ_{err} は、

$$\frac{\text{標準偏差}\sigma_{err}}{\text{最大変位}} = 1.0/29.0 \times 100 \approx 3.45[\%] \tag{9}$$

程度である。図-5(a)は最適化による目的変数値の推移で単調に減少しており、最適化が良好に行っていることがわかる。図-5(b)は同定変数の推移であり、いずれの同定変数も最適化の最終ステップでは正解値へと近づいている。しかし、最適化途中において、各同定変数は単純に正解値へと近づかず、最適化問題における目的関数の性質が、複雑であることが示唆された。

表-2 動作検証結果（変位誤差）

観測点	絶対誤差/最大変位		
	誤差(x 方向) [%]	誤差(y 方向) [%]	誤差(変位 z) [%]
p1-1	-0.93	-3.72	0.39
p1-2	4.61	-1.48	0.33
p1-3	-2.11	4.80	-4.16
p1-4	-3.13	-4.78	1.57
p1-5	-2.18	-1.06	-5.47
p2-1	-0.64	4.16	2.69
p2-2	-1.44	0.14	1.76
p2-3	1.15	1.47	-3.59
p2-4	-0.02	-1.24	-1.20
p2-5	2.81	2.59	3.37
p3-1	-1.64	2.85	0.37
p3-2	3.19	-1.83	-6.34
p3-3	-4.65	6.07	0.71
p3-4	3.60	1.85	1.13
p3-5	-0.01	-2.39	1.22
p4-1	1.75	1.56	1.55
p4-2	-6.45	-2.03	1.24
p4-3	-3.82	-0.70	4.77
p4-4	4.51	1.85	-3.94
p4-5	7.85	-3.86	-5.65
p5-1	-0.25	-1.80	0.90
p5-2	2.26	-4.19	-1.53
p5-3	6.55	-2.55	-4.24
p5-4	6.36	2.97	3.14
p5-5	-5.84	-5.41	-1.93



また、変位観測値と同定結果の変位誤差を表-2に示した。表-2より、最大変位に対する相対誤差は最大で6%程度であるため、観測誤差を考慮すると良好な同定結果であると考えられる。

図-6(a)、(b)に同定時の地質境界面分布、図-6(c)、(d)変位分布のコンター図を示す。なお、地質境界面より下側が地質 1、上側が地質 2 である。図-6(a)、(c)は正解の解析

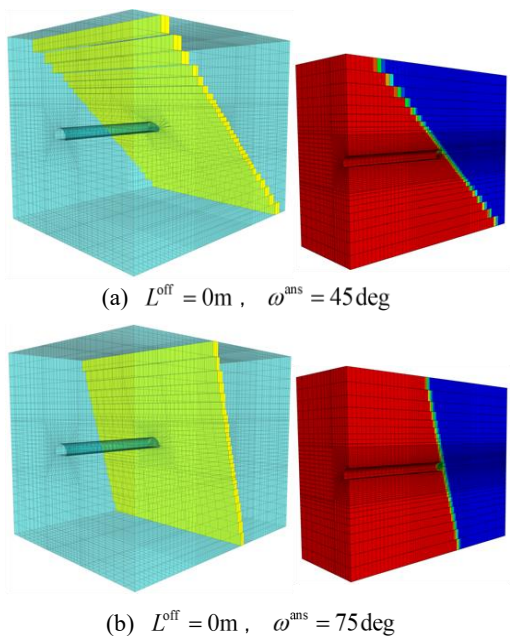


図- 7 正解の地質境界面と地質分布の例

モデル、図-6(b), (d)は同定結果のモデルでの地質境界面と変位分布を表す．これらを見ると同定結果は正解モデルに近い解の分布が得られていることがわかる．

以上より、式(6)~(8)で設定した最適化問題を解くことにより、設定した条件にて、三次元モデルにおける正解の地質境界を同定可能であることを確認した．

(3) 精度検証

本節では、正解の地質境界面の位置、観測誤差の大きさのそれぞれが地質境界面パラメータの同定精度に与える影響について確認を行う．精度検証で使用したパラメータを表-3 に示した．正解の地質境界面の位置については、トンネル切羽との距離である L^{off} を 0 ~ 12m の範囲で 3 通り、その y 軸からの傾きである ω^{ans} を 45, 75 deg の 2 通り、観測誤差の標準偏差 σ_{err} を 0.1, 1 mm の 2 通り設定し、合計 12 通りの条件の下で精度検証を実施した．なお、計算負荷低減を目的として、地質境界面に関わるパラメータ θ は同定対象とせず、 ω 、 d の 2 つのパラメータを同定した．ここで、図-7 に $L^{\text{off}} = 0\text{m}$ 、 $\omega^{\text{ans}} = 45, 75\text{deg}$ の場合の正解の地質境界面、地質分布を示した．なお、本精度検証に用いた条件は、切羽前方において、鉛直方向に広がる弱層が存在しており、その地質境界面を同定する状況を想定したものである．このような状況は実際の山岳トンネルの施工中にみられ、その分布の把握が施工の安全性や合理性につながるため、このような状況での地質境界面同定は、本技術の主要なニーズの一つである．

観測値の最大変位は、例えば $(\omega^{\text{ans}}, d^{\text{ans}}) = (45\text{deg}, 0\text{m})$ 、 $L^{\text{off}} = 0\text{m}$ の正解の数値モデルにより計算したケースでは、p5-1 の z 方向変位（天端沈下）で 23.2 mm である．また与えた観測誤差の統計量 $\sigma_{\text{err}} = 0.1, 1\text{mm}$ は、式(9)と同様に、最大変位に対して 0.431, 4.31 %程度である．

図- 8(a) ~ (d)に精度検証における、横軸に正解の地質

表- 3 精度検証に使用したパラメータ

パラメータ名	値
θ^{ans}	0 deg
ω^{ans}	{45, 75} deg
d^{ans}	0 m
θ^{ini}	0 deg
ω^{ini}	0 deg
d^{ini}	-5 m
E_1	1 GPa
E_2	3 GPa
ν	0.2
σ_{ini}	6 MPa
σ_{err}	{0.1, 1} mm
L^{off}	{0, 8, 12} m

境界面とトンネル切羽との距離 L^{off} をとった際の、推定パラメータ ω 、 d の同定誤差を示す．図- 8(a), (b)は $\omega^{\text{ans}} = 45\text{deg}$ の場合の ω 、 d それぞれの同定誤差である．この場合には、 ω 、 d でそれぞれ 5 deg, 2.5 m 以内の誤差で同定ができた．また、観測誤差が大きく、 L^{off} が大きくなるほど、同定誤差も大きくなる傾向が見られた．図- 8(c), (d)は $\omega^{\text{ans}} = 75\text{deg}$ の場合の ω 、 d それぞれの同定誤差である．観測誤差の統計量 σ_{err} が 0.1mm と小さい場合には、 ω 、 d でそれぞれ 0.87 deg, 1.75 m 以内の誤差で同定ができたのに対し、観測誤差の統計量 σ_{err} が 1.0mm の場合には、 ω 、 d でそれぞれ 49.68 deg, 29.98 m 以内となり、比較的大きな同定誤差が発生した．

このような結果が得られた原因として、 $\omega^{\text{ans}} = 75\text{deg}$ のように、切羽前方の地質境界面が鉛直方向に広がるような場合には、弱層の掘削前に、弱層部の存在が既掘削部の観測変位へ及ぼす影響が小さく、観測誤差によりその影響が埋もれていることが考えられる．その場合には、逆解析により正解の地質境界面を同定することが原理的に困難であると考ええる．

4. おわりに

本研究では、トンネル壁面の計測変位を観測データとして用い、地質境界面を逆解析により同定する手法の構築と双子実験によるアルゴリズムの動作確認、検証を行った．以下に得られた知見と今後の課題を示した．

(1) 得られた知見

切羽前方の鉛直方向に広がる弱層など、三次元的な地質境界面の同定においては、切羽と地質境界面との距離が大きくなるにつれて同定誤差が大きくなることが確認できた．その地質境界面がトンネル軸となす角度が45degの場合、地質境界面の傾きと位置のパラメータ ω 、 d のそれぞれで5deg, 2.5m以内の誤差で同定できた．一方、なす角度が75degの場合には同定誤差が増大し、正解に近い同定値が得られなかった．これは、切羽前方にほぼ鉛直に分布する弱層は掘削部の観測変位に及ぼす影響が非常に小さいためである．しかし、鉛直方向の弱層は、水平方向

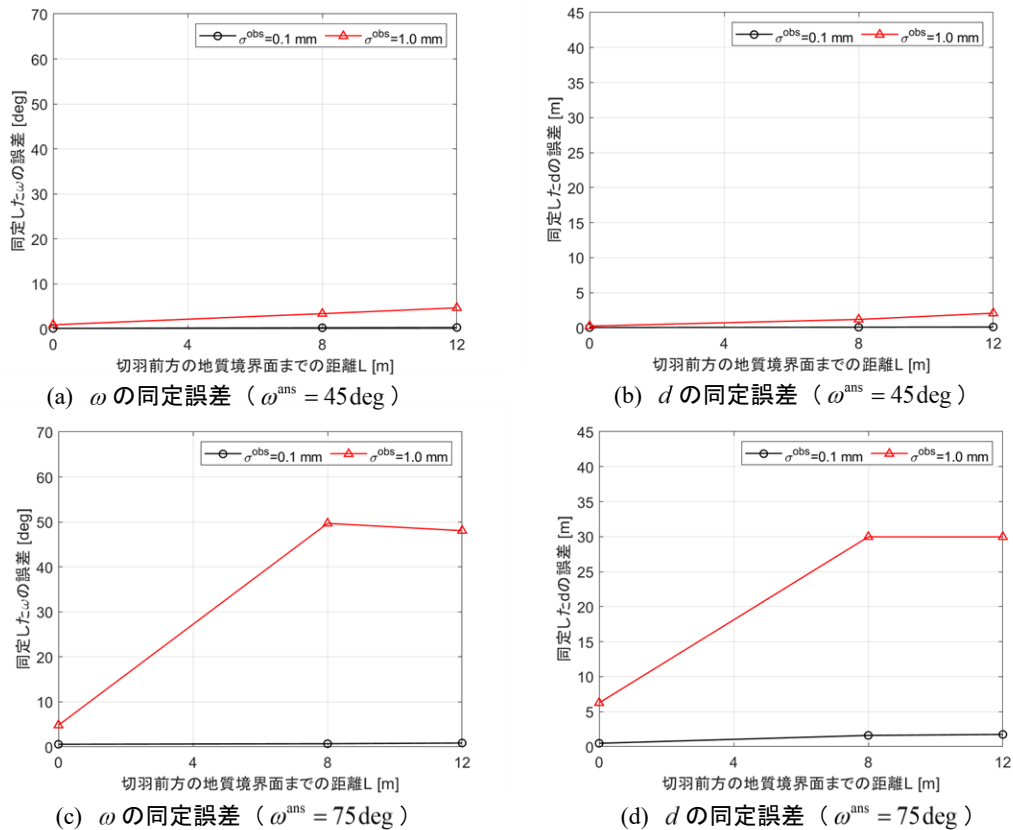


図-8 精度検証における同定誤差 (絶対値)

に分布する弱層と比べて先進ボーリングや物理探査等で探知し易い。反対に、本手法はトンネル軸方向と平行に分布するような弱層の同定に強い。両者を組み合わせることで、より確度の高い弱層分布の把握が可能になると考えられる。

(2) 今後の課題

正解に近い同定値が得られたケースにおいても、観測誤差に応じて同定誤差が発生した。同定精度向上と信頼性評価の観点から、カルマンフィルタなど誤差を考慮可能な手法の適用が望ましいと考える。また、本研究では線形弾性体を対象としたが、実際の地盤、岩盤は弾塑性的な挙動を示すため、弾塑性材料を用いた検討を行うことが必要であると考える。その際には、構成則のモデル化誤差の扱いも課題になると考える。

参考文献

- [1] Gioda, G. and Sakurai, S.: Back analysis procedures for the interpretation of field measurements in geomechanics, *Int. J. Numer. Anal. Methods. Geomec.*, Vol.11, pp.555-583, 1987.
- [2] S. Sakurai and T. Kunifumi, "Back Analysis of Measured Displacement of Tunnels," *Rock Mechanics and Rock Engineering*, vol. 16, pp. 173-180, 1983.
- [3] S. Sakurai, S. Akutagawa, K. Takeuchi, M. Shinji and N. Shimizu, "Back Analysis for tunnel engineering as a

modern observational method," *Tunneling and underground Space Technology*, vol. 18, pp. 185-196, 2003.

- [4] G. Gioda, "Some remarks on back analysis and characterization problems in geomechanics," *Proceedings 5th International Conference on Numerical Method in Geomechanics*, vol. 1, pp. 49-61, 1985.
- [5] W.-G. W. Yeh, "Review of parameter identification procedures in groundwater hydrology; the inverse problem," *Water Resources Research*, vol. 22, no. 2, pp. 95-108, 1986.
- [6] 青野泰久, 櫻井英行, 山本真哉: データ同化による施工中の地下構造物の挙動の予測手法, 計算工学講演会論文集, Vol.26, 2021.
- [7] 力石将光: トンネル掘削における発破振動を用いた地質境界の同定に関する研究, 中央大学大学院研究年報 理工学研究科編, Vol.41, 2011.
- [8] 三瓶重範: 発破振動に基づく地山の地質境界の同定に関する研究, 中央大学大学院研究年報 理工学研究科編, Vol.43, 2013.
- [9] 竿元英貴, 加瀬祐子, 森宏, 吉見雅行, 堀川晴央, 阿部信太郎: 位相最適化に基づく断層形状推定手法の開発, 土木学会論文集A1 (構造・地震工学), Vol.71, No.3, pp.21-31, 2015.