仮設土留めのリアルタイム安全監視システム構築へ向けた逆解析の定式化

○新潟大学 学生会員 児玉 真乃介
新潟大学 正会員 大竹 雄
岐阜大学 正会員 本城 勇介
東京都市大学 正会員 吉田 郁政

1. 研究の背景と目的

国内外の主要な設計基準が性能規定化の徹底と信頼性設計法の概念に基づく部分係数法（AASHTO の荷重抵抗係数法(LRFD)と同等）の導入，耐久性，維持管理への配慮事項を考慮した基準へと改定が進んでいる．この改定により，我々は，構造物の信頼性を記述するための評価尺度を手にすることになる．そして，この評価尺度は，新設設計段階のみならず，施工中・供用中の構造物の維持管理においても同様に適用できるものである．

著者らは，仮設土留め工を対象として，施工時に得られる土留め壁の変位を有効活用して，安全管理の高度化を目指している．本研究では，実際の観測データに基づく実用性の高い検討を行うとともに，逆解析と信頼性解析を結合することを目標としている．

2. 研究の方法

土留め工における情報化施工では，土留め壁の変位を観測するのが一般的である．そして，土留め工に逆解析を適用することを考えると，変位を観測し，壁に作用する主働土圧（荷重），土留め壁の変位により生じる地盤反力（抵抗）を同定しなければならない．すなわち，荷重および抵抗の両者が未知量となる本来的に性質の悪い問題設定であると考えられる．さらには，地盤材料は，初期のひずみレベルから強い非線形特性を有するため，観測方程式が非線形関係となることから，逆問題の定式化が複雑になり，また最適化に長い時間がかかる可能性が高い．

以上を踏まえて，本研究では，2 つの STEP で逆解析を構成することとする．まず，STEP-1 では，逆解析における未知量を土留め壁に作用する力（主働土圧，地盤反力）とすることによって，観測量と未知量を線形関係で定式化する．土留め壁の変位により生じる地盤反力は非線形特性を示すが，最終的に力が釣り合った状態にのみ着目すると，後述するように線形問題として定式化することができる．STEP-2 では，STEP-1 で同定された力から，主働土圧係数や地盤変形係数，せん断強度定数等の計算パラメータに変換することとした．線形関係として定式化することによって，以下のメリットがある．

- 瞬時に安定した逆解析を行うことができ，リアルタイム安全監視システムに有用である
- 誤差の意味を考察することが容易となり，逆問題の性質を議論することができる．
- 誤差を定量化することにより，信頼性設計と容易に結合することができる．

1) 順解析（予測解析）

設計計算等に用いられる土留め工の順解析では，地盤の土圧係数，せん断強度定数，地盤反力係数（地盤変形係数）が主な計算パラメータとなる．土留め壁は弾性梁でモデル化され，受働側の地盤は，バネ（地盤反力係数）でモデル化される．バネは，受働土圧を地盤反力の上限として設定した完全弾塑性モデルとしてモデル化されるのが一般的である．

図-1 は，土留め工の計算モデルを示している．土留め壁（梁）の剛性マトリクス**K**に分布バネマトリクス**C**を加えることによって，地盤バネが表現される．

$$\boldsymbol{\delta} = (\mathbf{K}+\mathbf{C})^{-1}\mathbf{P_{ae}} \quad (1)$$

ここで，$\boldsymbol{\delta}$ は節点変位ベクトル，$\mathbf{P_{ae}}$は，有効主働側圧であり，計算方法は大深度土留め設計・施行指針（案）[2]に詳しい．また，**C**地盤反力係数を剛性マトリクスに対応した形となっている．**C**は，土留め壁の変位に依存するため，一般的には，逐次解析により各点の降伏判定を行いながら繰り返し計算により最終的な土留め壁の変位が計算される．

2) 逆解析

これに対して，本研究で提案する逆解析の模式図を**図-1(b)**に示している．**図-1(c)**は，任意深度に単位荷重を与えて変位を計算し，逆問題の基底としたものである．ここで，地盤バネは設定していない．この基底の重ね合わせを観測行列 **H** とすると，式(3)のような観測方程式で，変位量 **z**（水平変位，回転角）と外力**x**（有効側圧または地盤反力）の関係を線形で定式化することができる．本研究の逆解析では，観測量をより詳細に未知量に反映させるため，水平力に加え，曲げモーメントも未知量とする．

$$\mathbf{z} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{v} \quad (3)$$

ここで**v**は観測誤差ベクトルであり，$E[\mathbf{v}\mathbf{v}^{\mathbf{T}}] = \mathbf{R}$と定義する．**x**と**v**は無相関で，ガウス分布に従うと仮定する．**H** は，下記の行列である．

$$\mathbf{H} = (\mathbf{H_1} \quad \mathbf{H_2} \quad \mathbf{H_3}) \quad (4)$$

$\mathbf{H_1}$，$\mathbf{H_2}$，$\mathbf{H_3}$は，それぞれ，有効側圧（主働），地盤反力（受働），モーメント（受働）に対応する観測（変位，回転角）との関係を表す行列である．式(3)の観測方程式を基に，ベイズの理論を適用する．条件付き確率$P(\mathbf{x}/\mathbf{z})$を最大にする **x** を求めるべき推定値とすると，線形の場合の推定値は次に示すように簡単に求めることができる [3]．

$$\hat{\mathbf{x}} = \bar{\mathbf{x}} + \mathbf{P}\mathbf{H}^{\mathbf{T}}\mathbf{R}^{-1}(\mathbf{z} - \mathbf{H}\bar{\mathbf{x}}) \quad (5)$$

$$\mathbf{P} = (\mathbf{M}^{-1} + \mathbf{H}^{\mathbf{T}}\mathbf{R}^{-1}\mathbf{H})^{-1} \quad (6)$$

ここで，$\bar{\mathbf{x}}$は未知量の平均値，**M** は事前情報の誤差（共分散行列）であり，**P** は更新後の **M** を意味している．事前情報の誤差は変動係数 30%，観測誤差は実データにおける温度変化による変動の幅としている．尚，実際の安全管理では最大変位を管理するので，荷重の推定誤差を変位の推定誤差で$\mathbf{R_x}$に変換する必要がある(式(4))．

$$\mathbf{R_x} = \mathbf{H}\mathbf{P}\mathbf{H}^{\mathbf{T}} \quad (4)$$

観測量と未知量の誤差の他に，モデル化の誤差などを考慮するため，掘削段階毎に事前情報誤差の 10 分の 1 をシステムノイズとして事前情報誤差に加える．

3) 地盤物性値更新

次の掘削段階で更新結果を反映させるために，逆解析で同定した荷重を，地盤物性値に変換する必要がある．有効主働側圧と，抵抗力それぞれに起因する，

キーワード 逆解析，土留め工，観測誤差，信頼性解析
連絡先 〒950-2181 新潟市西区五十嵐 2 の町 8050 番地 TEL：025-262-7479

主働土圧係数と変形係数を更新対象とする．

4) 地盤物性値更新

次の掘削段階で更新結果を反映させるために，逆解析で同定した荷重を，地盤物性値に変換する必要がある．有効主働側圧と，抵抗力それぞれに起因する，主働土圧係数と変形係数を更新対象とする．

① 主働土圧係数

主働土圧に起因する地盤物性値は複数存在するが，今回は最も不確実性の高い主働土圧係数のみに更新結果を反映させる．更新後の主働土圧係数は，更新後の側圧（逆解析によって同定した有効主働側圧）と，更新前の側圧（設計基準により求めた有効主働側圧）の比を，更新前の主働土圧係数（設計基準）にかけることによって求める．

② 変形係数

1)で述べたように，土留め工の予測解析では，背面側の外力に対する抵抗は，地盤バネで考慮している．地盤バネを表している分布バネマトリクスは，水平地盤反力係数が基になっており，水平地盤半力係数は変形係数から求めることができる．したがって，変形係数を更新することが，地盤反力（抵抗側の条件）を更新することになる．変形係数を疑似乱数で発生させ，予測解析と同じ方法から地盤反力を計算し，更新後の地盤反力に対して，最も尤度が高い変形係数を，更新後の変形係数としている．これは，パラメータの事前分布を一様分布に設定した場合の，粒子フィルタのアルゴリズムと等価である[4]．以上の定式化に基づいて，**図-2** のような実際の土留め工で得られた実データに対して解析を行い，検証する．

3. 結果と考察

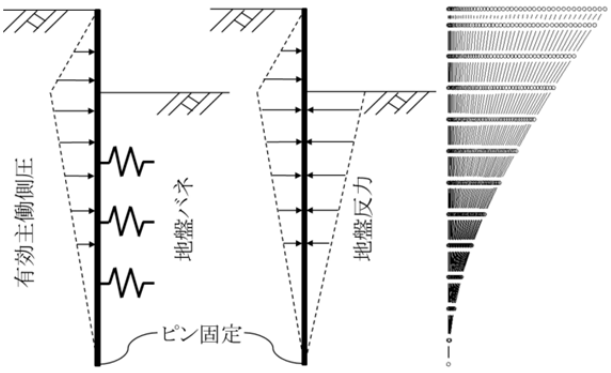
図-3 は，1 次掘削時（2.5m 掘削）の逆解析結果である．観測値を再現できていることがわかる．また，設計基準による荷重分布と近い値となっていることから，地盤工学的に理解できる側圧分布，地盤反力分布が得られていると解釈することができる．以上のことから，逆問題として適切なモデル化がなされていると考えられる．幅は誤差を表している．**図-4** は，2 次掘削時（6.5m 掘削）の予測結果となっている．1 次掘削時の逆解析によって同定した荷重を，地盤物性値に変換し，2 時掘削時の荷重予測に利用している．地盤物性値を更新して計算した変位は，更新していないものよりも実測値に近い値となっていることがわかる．逆解析によって定量的に現場の地盤条件を更新できていることがわかる．

4. まとめ

以上，検討概要を述べてきたが，主に以下の結果が得られている．線形の逆問題として定式化することで，リアルタイム予測システムにおいて有用に機能する逆問題手法を提案することができた．今後，現在注目されている逆問題における不適切性解消の手段である，スパースモデリングを土留め工に適用し，逆問題の性質についてより詳しく考察する．また，事前情報の誤差，観測誤差の感度分析を行うことにより，土留め工の逆解析と信頼性解析を合理的に結合する方法を議論する予定である．

参考文献

1) 斎藤悦郎，門田俊一：地盤工学における逆解析，講座 10.山留掘削，土と基礎，44-1，pp.51-56，1996.
2) 財団法人，先端建設技術センター：大深度土留め設計・施行指針（案），1994.10
3) 吉田郁政，黒瀬浩公，福井史郎：確率論に基づく逆解析手法の基礎研究，土木学会論文集，No.483/I-26,pp.61-68,1994.1
4) 山本真哉：粒子フィルタ，土木学会応用力学委員会逆問題小委員会ホームページ逆問題副読本



(a)一般的な計算モデル (b)本研究モデル (c)逆問題の基底

図-1 土留め工のモデル化

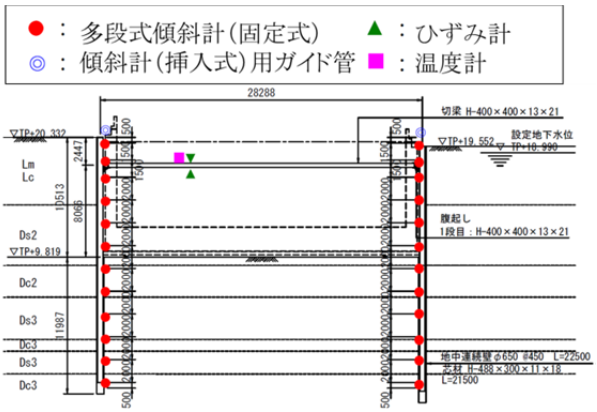


図-2 解析対象とする土留め工

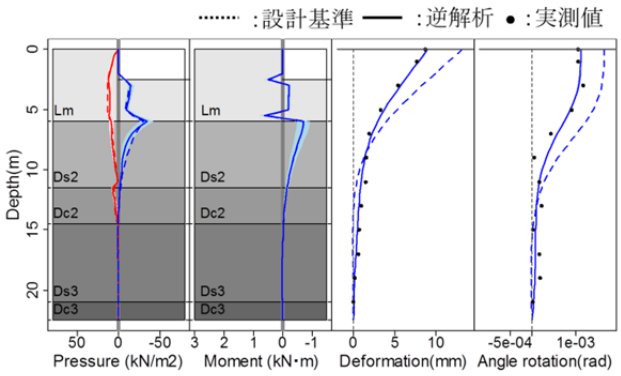


図-3 1 次掘削の逆解析結果

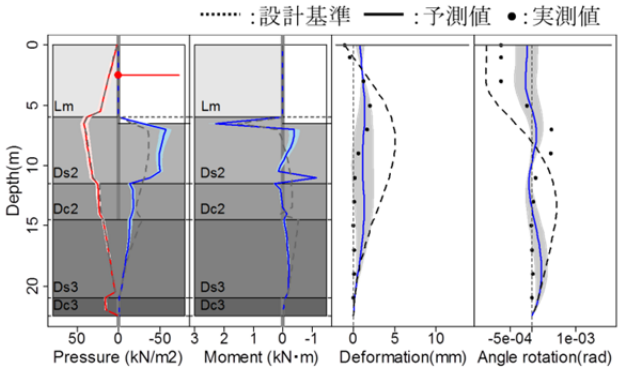


図-4 1次掘削で更新した地盤物性値を利用した2次掘削の予測値