

動的有効応力解析のデータ駆動型検証方法の開発

新潟大学 学生会員 茂野 恭平
新潟大学 正会員 大竹 雄
京都大学 正会員 肥後 陽介

1. 研究の背景と目的

近年、液状化時の地震時挙動を予測する手法として、動的有効応力解析LIQCA¹⁾をはじめとする高度な数値解析手法が開発され、実用化されている。これらの解析手法は、模型実験との比較や、実構造物の液状化被害事例との比較から、有効性の検証が行われてきた。

しかし、このような高度な数値解析では、多数の入力パラメータを設定することを要求する。模型実験や被害事例との比較検証では、現象（結果）が分かった状態で、その現象を再現できるような入力パラメータを試行錯誤的に逆推定することが行われる。しかし、実際の構造物設計や照査では、これらの入力パラメータを事前に決定することが求められるため、入力パラメータの設定精度が数値解析の精度を支配していると考えられる。

従って、著者らは、この入力パラメータ設定の推定精度が解析結果に与える影響（精度）を定量化することは、これら解析手法の検証（Validation）をしたこととみなすことができる、との立場をとる。以上を踏まえて、本研究では、LIQCAに着目して、その入力パラメータを観測（要素試験など）により情報更新すること、数値解析結果の代替モデル（空間分布を考慮）を導出することにより、解析精度を定量化することを試みる。

2. 研究方法

2.1 本研究で用いるデータ

本解析で扱うデータはLIQCA2011マニュアル¹⁾、その他地盤試料に記載されている入力パラメータセットの設定事例を収集した。合計19セットで、様々な液状化特性の検討結果が含まれている。（詳細は紙面の都合上割愛）

2.2 パラメータ更新の手順

LIQCAに用いる入力パラメータは、初期間隙比 e_0 、圧縮指数 λ 、膨潤指数 κ 、擬似過圧密比 OCR 、無次元初期せん断剛性 G_0/σ_m 、破壊応力比 M_f 、変相応力比 M_m 、硬化関数パラメータ B_0 、 B_1 、規準ひずみ（塑性） γ_r^p 、規準ひずみ（弾性） γ_r^E 、ダイレイタンシー係数 D_0 、 n 、異方性消失パラメータ C_d である。

このデータベースに対して、パラメータの相互関係を正規分布の多次元同時確率密度分布に変換した上で、主成分分析によりMode Reductionを行う。主成分分析とは、共分散行列に基づく主軸を求め、その分散の大きい軸を指標としてデータの次元を縮約する方法である。

主成分分析結果を図1に示す。第1主成分、第2主成分までの累積寄与率はおよそ53%である。図中の矢印はLIQCAに用いるパラメータを示しており、それぞれのパラメータが第1主成分、第2主成分に与える影響度を表している。また黒色のプロットは各地盤試料の結果である。それぞれの主成分の意味を考察すると、第1主成分Comp1に寄与するパラメータは、 G_0/σ_m 、 B_0 、 B_1 、 κ 、 e_0 であり、「硬さ（軟らかさ）」を表す軸であると解釈される。第2主成分Comp2に寄与するパラメータは、 M_f 、 n 、 D_0 、 γ_r^p 、 γ_r^E であり、「強度（脆弱さ）」を表すと解釈される。

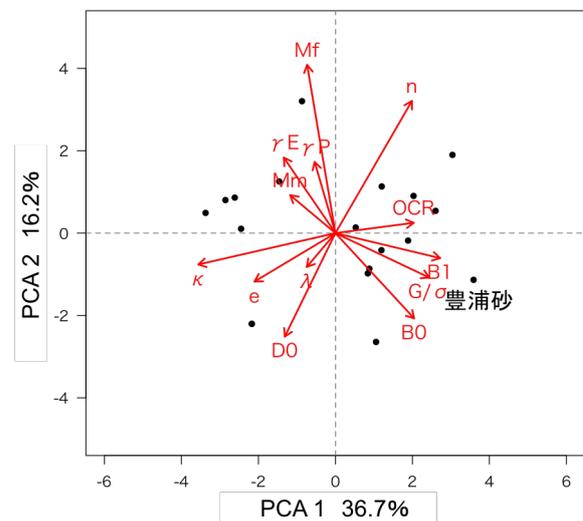


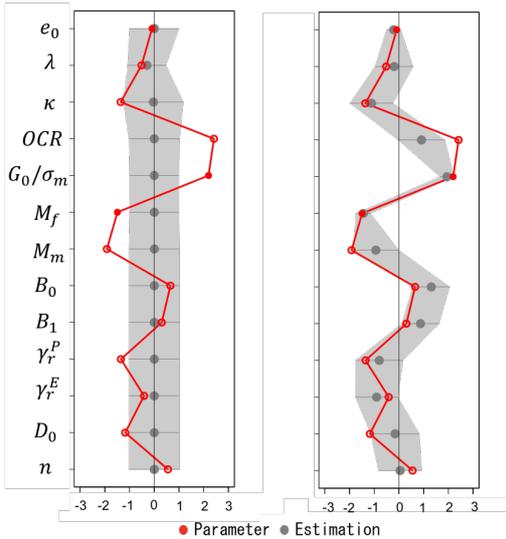
図1 主成分分析結果

観測（要素試験など）により、得られる部分的な情報に基づいて、パラメータ全体をベイズ推定する。事前にパラメータセットを正規分布の多次元確率密度分布に変化しているため、式(1)により、容易にパラメータセットの更新を行うことができる。

$$\begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \bar{x}_1 \\ \bar{x}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} M_{11} \\ M'_{12} \end{bmatrix} [M_{11} + R]^{-1} \{z - \bar{x}_1\} \quad (1)$$

ここで、 x_1 , x_2 は観測点と観測点以外のベクトル、 \bar{x}_1 , \bar{x}_2 はその平均値ベクトル、 M_{11} は観測点における共分散行列、 M_{12} は観測点と観測点以外における共分散行列、 z は観測量、 R は観測誤差である。

3. 試算例



(a) 更新前 (b) 更新後

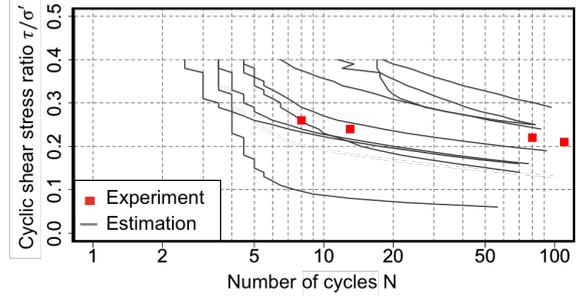
図2 各パラメータ推定結果(豊浦砂)

LIQCAに用いるパラメータ13個の内、間隙比 e_0 、無次元初期せん断係数 G_0/σ_m 、破壊応力比 M_f は、要素試験により観測が可能でパラメータである。従って、これらが得られたとして、その他のパラメータセットの推定を行う。

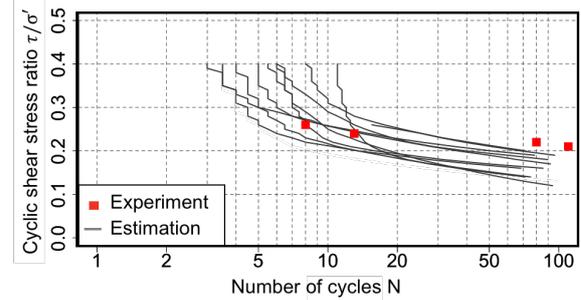
例として図1に示した豊浦砂¹⁾の推定パラメータを図2に示す。また、推定パラメータから要素シミュレーションした液状化強度曲線を図3、動的変形特性を図4に示す。多次元同時確率密度により乱数により10ケースのシミュレーションを行っている。推定パラメータは、実データに概ね一致していると考えられる。

3. 今後の展望

今後は、実験計画法に基づいて、数値解析のパラメトリックスタディ解析を行い、得られた解析結果に着目する。得られた複数の解析結果群に対して、パラメータ空間と同様に主成分分析を行い、Mode Reductionし、パラメータ空間と解析結果空間を線形回帰分析(ベイズ回帰)で結合することにより、代替モデルの構築を行う。最後にパラメータの推定精度が解析結果の精度に与える影響を定量化する予定である。

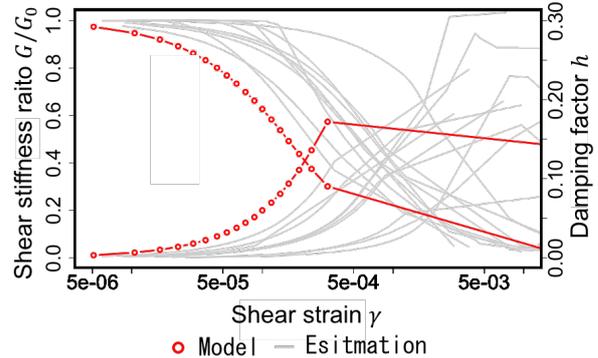


(a)更新前

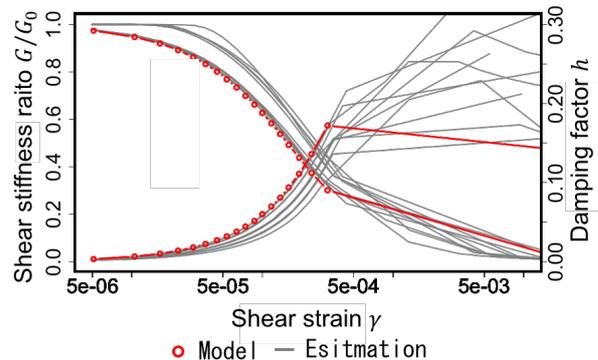


(b)更新後

図3 液状化強度曲線(豊浦砂)



(a) 更新前



(b) 更新後

図4 動的変形特性(豊浦砂)

参考文献:

- 1) 液状化解析手法 LIQCA 開発グループ: LIQCA2D07 (2007年公開版)資料, 2011.