

土質試験における不確かさの考察

不確かさ 土質試験 三軸圧縮試験

徳島大学大学院 学生会員 ○賈擘 肥前大樹
 徳島大学大学院 非会員 榊藤宏樹
 徳島大学 非会員 細野滉太
 徳島大学大学院 正会員 上野勝利

1. 研究の背景と目的

近年コンピュータによる予測解析の信頼性や精度向上のための手段として様々な分野で V&V(Verification & Validation) という、予測解析の信頼性評価を行うプロセスが注目されている¹⁾。しかし、従来の地盤工学分野では土の構成式に代表されるモデルの表現力向上が研究主題となっており、数値計算の正しさや各種モデルの不確かさを曖昧にしたまま予測精度の検討が行われている²⁾。そこで、地盤工学分野にも V&V を適応し、数値解析の信頼性向上を行うため、本実験では飽和土圧密非排水三軸圧縮試験を行い、実験値の不確かさについて検討する。その後、実験値から得られた材料パラメータを用いて、Cam-clay モデルを使用した三軸圧縮試験の再現解析を行い解析結果の妥当性の検討を行う。

2. 実験概要

実験に用いた三軸試験装置のシステム図を図 1 に示す。試験は予圧密過程、供試体作製過程、圧密過程、せん断過程の 4 過程に分けられる。予圧密過程では、段階的に圧力を載荷することにより予圧密を行い試験で使用する試料を作製した。供試体作製過程ではトリミング法により供試体を作製した。圧密過程では、段階的に拘束圧をかけ、等方圧の状態での圧密を行った。せん断過程では軸荷重をひずみ速度一定で載荷させ、応力-ひずみ、過剰間隙水圧関係を測定した。

供試体は、直径 5cm、高さ 10cm の円柱供試体で、拘束圧は 100, 150, 200kPa とし、圧密非排水単調三軸圧縮試験を行う。

3. 実験結果

本研究では、最終拘束圧 100kPa を 4 ケース、150kPa を 3 ケース、150kPa を 3 ケース、200kPa を 3 ケースの合計 10 ケースを実施した。

3.1 圧密過程

圧密過程では、 e - $\log p$ 曲線から得られる圧縮指数 λ 、膨潤指数 κ の不確かさについて検討した。 e - $\ln p$ 曲線とそこから求まる λ 、 κ の例を図 2 に示す。 λ の決定は試験者がグラフを確認し接線となる線を判断しその傾きから求まるた

め、接線の決定者が異なると同じ e - $\log p$ 曲線を用いても異なる値となる可能性がある。本試験では、2 人の決定者により求まる λ の値を比較した。求まったヒストグラムを図 3 に示す。決定者 A による λ の平均値は 0.84、決定者 B による λ の平均値は 0.82 と異なる結果となった。しかし、分散分析を行った結果決定者の違いにより求まる値のばらつきに影響はないという結果となった。 κ の平均値は 0.011 となった。

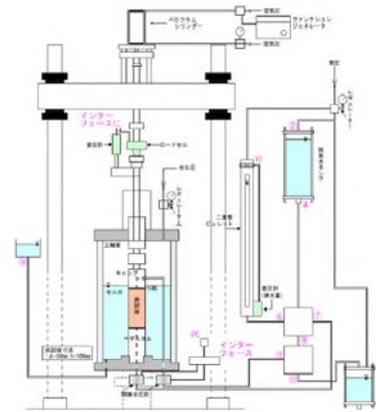


図 1 三軸試験装置システム図

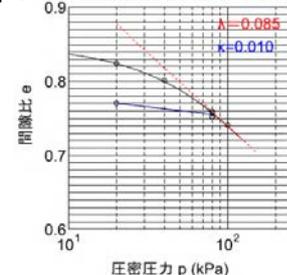


図 2 ケース 1 における e - $\log p$ 曲線

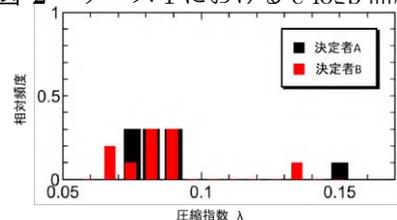


図 3 圧縮指数 λ にのヒストグラム

3.2 せん断過程

せん断過程では有効応力経路とモール円から得られる限界状態応力比 M 、粘着力 C' 、内部摩擦角 ϕ' の不確かさについて検討した。 M は拘束圧 3 種類および 2 種類の組合せから、また各有効応力経路から求める 3 種類の決定方法から求めた。それぞれ平均値は 1.35, 1.34, 1.35 という結

果となった。各決定方法から得られた結果をヒストグラムにしたものを図4に示す。粘着力 C' は $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ と σ_3 から算出する方法、

$(\sigma_1 - \sigma_3)_f/2$ と $(\sigma_1 + \sigma_3)_f/2$ から算出する方法の2種類で、 ϕ' は上記の方法と $C'=0$ と仮定し各応力円から求める方法の3種類の方法から得た。それぞれの方法で決定した C' (kPa) の平均値は 5.57, 6.48, ϕ' ($^\circ$) の平均値は 29.28, 29.43, 33.79 となった。各決定方法から得られた結果をヒストグラムにしたものを図5と図6に示す。各パラメータについて決定方法の違いにより実験結果のばらつきに影響を及ぼすか分散分析を行ったところ、 ϕ' については決定方法の違いが結果のばらつきに影響を及ぼすという結果となった。

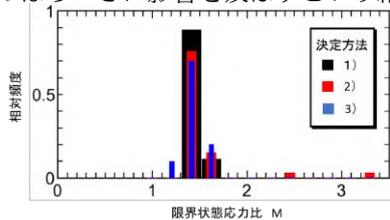


図4 限界状態応力比 M のヒストグラム

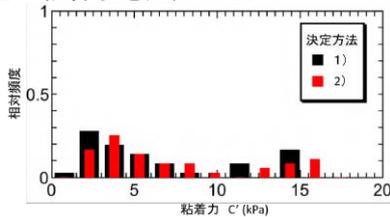


図5 粘着力 C' のヒストグラム

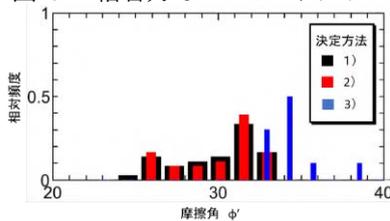


図6 内部摩擦角 ϕ' のヒストグラム

4. 各材料パラメータにおける感度解析

実験結果から得られた圧縮指数 λ 、膨潤指数 κ 、限界状態応力比 M を材料パラメータとして、Cam-clay モデルにて三軸圧縮試験の再現解析をおこなった。各パラメータによる感度解析をおこない、その解析結果の応力-ひずみ曲線および有効応力経路から観測できる、ひずみ 0.5% 時におけるヤング率 E 、破壊時の主応力差 q_f 、破壊時の有効応力 p'_f への影響度を回帰分析を用いて検討した。回帰分析の結果、 E については各パラメータの影響度は同じであるが拘束圧によって影響度の結果が異なるものとなった。 q_f 、 p'_f については λ による解析結果への影響度が最も高いと判断できる結果となった。

5. 妥当性の検討

実験結果から得られた各材料パラメータの平均値 μ に標準偏差 σ を $\pm 1.0 \sigma$ 、 $\pm 2.0 \sigma$ したものをそれぞれ求め、そ

のすべての組合せ、 $5 \times 5 \times 5 = 125$ 通りの組合せで解析を行った。そこから得られた解析結果と実験結果から得られる応力-ひずみ曲線および有効応力経路を比較することにより解析結果の妥当性の検証を行った。各拘束圧における解析結果と実験結果を図7に示す。破壊時の主応力差 q_f 、破壊時の有効応力 p'_f の解析結果は実験値よりも小さい値を示すケースもあるが概ね実験値を再現しており妥当性のあるものだと判断できる結果となった。しかし、ひずみ 0.5% 時におけるヤング率 E を比較すると拘束圧にもよるが解析結果が実験結果の約 1/2 程度となる結果となった。

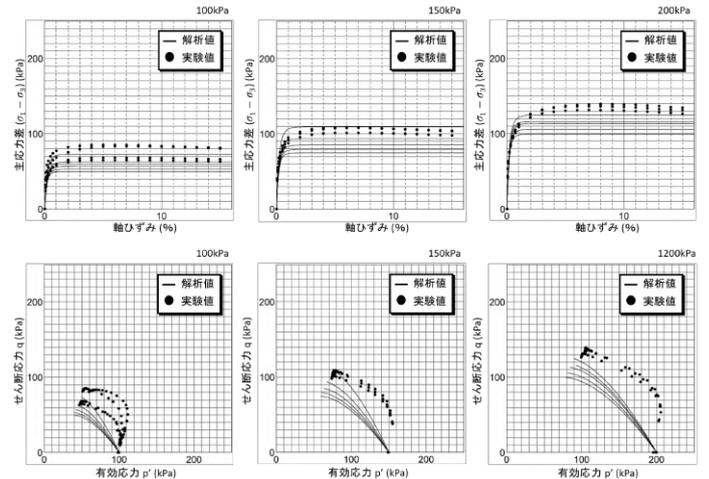


図7 実験値と解析値の比較

6. 結論

本研究では、飽和土圧密非排水三軸圧縮試験を行い、実験値の不確かさについて検討した後、Cam-clay モデルを使用した三軸圧縮試験の再現解析の妥当性の検討を行った。パラメータの決定方法の違いが実験結果のばらつきに影響を与える場合もある事がわかった。また、解析結果は実験結果を概ね再現しているが、せん断初期における計算モデルの検証と追加実験を行い実験値の妥当性もさらに検討する事で、より信頼性の高い解析結果を得られると考えられる。

参考文献

- 1) Ivo Babuska, J. Tinsley Oden, Verification and validation in computational engineering and science: basic concept, Computer methods in applied mechanics and engineering, 193(2004)4057-4066
- 2) 本城勇介, 地盤工学における信頼性設計に関する研究の展開と課題, 地盤工学会誌, 63(5), 1-5, 2015.