

## 締固められた不飽和土の一軸圧縮強度の精度に関する統計的考察

鹿児島大学 学生会員 ○室田陸治, 慶田佑太

鹿児島大学学術研究院 正会員 酒匂一成, 伊藤真一

### 1. はじめに

不飽和土質力学の体系化を目指して, Kitamura and Sako は, 確率・統計を援用した数値計算モデルを提案している<sup>1)</sup>。その中で, せん断強度に関するモデルも提案しているが, モデルの妥当性の検証のためには締固められた不飽和土の強度に関する試験データが必要である。そこで, 赤鹿ら<sup>2)</sup>は締固めエネルギーを制御した供試体の一軸圧縮強度の試験データ蓄積を試みた。しかし, 一軸圧縮試験の際に写真-1(a), (b)のように異なる破壊形状が観察され, 写真-1(b)の状態の方が, 一軸圧縮強度が低くなる傾向が生じた。この要因として, 一軸圧縮試験の際の端面摩擦が供試体の強度に影響を及ぼしている可能性が考えられる。そこで, 本研究では, より精度の高い一軸圧縮試験データを得るために, 一軸圧縮試験の際にテフロンシートを供試体の両端に使用し, 端面摩擦の軽減を試みる。また, 赤鹿らが行ったテフロンシートを使用していない試験データ<sup>2)</sup>との比較を行い, テフロンシートの有無による一軸圧縮強度の平均や分散について, 統計的検討を行う。

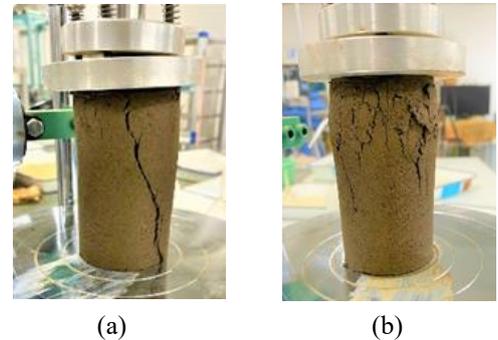


写真-1 供試体の破壊形状の違い



写真-2 締固め装置

### 2. 試験概要

写真-2 は一軸圧縮試験用の供試体を作製するための締固め装置<sup>2)</sup>である。締固めエネルギーは, A-a 法<sup>3)</sup>で用いられる  $550(\text{kJ}/\text{m}^3)$ に設定し, 締固め装置の重量, 落下高さ, 落下回数, 層の数, モールドの容積をそれぞれ  $W_R=0.0103(\text{kN})$ ,  $H=0.14(\text{m})$ ,  $N_B=25(\text{回})$ ,  $N_L=3(\text{層})$ ,  $V=0.0196(\text{m}^3)$ とした。本研究で用いる土試料として串良川堤体土(以下, 堤体土)を用いた。堤体土の土粒子密度は  $\rho_s=2.49(\text{g}/\text{cm}^3)$ であった。また供試体の含水比  $w$  が 5, 10, 15, 20, 25%になるように試料の含水調整を行った。各含水比の供試体において, 10 回の一軸圧縮試験を実施した。締固め後に供試体の重量と体積を計測した後, テフロンシートを供試体の上下端に設置し一軸圧縮試験を実施した。試験後には, 破壊した供試体の 3 箇所含水比を測定した。

### 3. テフロンシートが供試体の強度に及ぼす効果の統計的分析

赤鹿らが行ったテフロンシートを使用していない試験データ<sup>2)</sup>を Case.1, テフロンシートを使用した試験データを Case.2 として一軸圧縮強度の平均, 標準偏差を表-1 にまとめた。なお, 平均や標準偏差は各設定含水比において, Case.1 は 100 個, Case.2 は 10 個の一軸圧縮試験データから求められている。これらの試験データからテフロンシートを使用したことによる有意な強度差の有無と, 供試体の強度のばらつきによる低減効果について検定を行う。ここで, テフロンシートを使用していない Case.1 を正規分布に従う母集団と仮定し, テフロンシートを使用していない Case.2 を検定の対象となる標本として  $u$  検定で調べた。検定する仮説は「帰無仮説  $H_0$ : テフロンシートの有無による平均強度差は無い」とする。表-1 の試験データを用いて各含水比の統計値  $u$  を求めた結果を表-2 に示す。また, 標準正規分布から有意水準  $\alpha=0.05$  に対する両側検定での  $u$  の値は  $u(0.025)=1.96$  となり, 表-2 に示す各含水比における統計値  $u$  と比較すると, 含水比 5%, 10%, 25%は統計値  $u$  が棄却域にあるため, 一軸圧縮強度の平均について, テフロンシートの有無による有意差があると認められた。含水比 15%, 20%については, 統計値  $u$  が採択域にあるため, 帰無仮説は棄却されない。したがって, テフロンシートによる供試体の強度の平均について, 有意な差はあるとは言えないことがわかる。

次に、供試体の一軸圧縮強度について、テフロンシート有無による試験結果の分散の違いを等分散性の検定により調べた。検定する仮説は「帰無仮説  $H_0$ : 2つの分散は等しい」とする。表-1の試験データを用いて各含水比で不偏分散を求めた結果を表-3に示す。ここで、Case.1の標本数は  $n=100$ 、Case.2は  $n=10$  として検定を行った。また、 $F$ 分布から2つの自由度  $n_1-1$ 、 $n_2-1$  から、有意水準  $\alpha=0.05$  に対して i)  $v_1 > v_2$ 、ii)  $v_1 < v_2$  の場合の2つの境界値  $F_{\alpha}(n_1-1, n_2-1)$  を求めると、i)  $F_{0.05}(99, 9) = 1.97$ 、ii)  $F_{0.05}(9, 99) = 2.76$  となる。表-3の各含水比の不偏分散比  $F$  と比較すると、含水比5%、10%の統計値  $F$  は採択域にあるため、帰無仮説は棄却されず、テフロンシートの有無による分散の違いはあるとは言えないと判断される。含水比15%、20%、25%の統計値  $F$  は棄却域にあるため、帰無仮説は棄却され、テフロンシートの有無による分散の違いがあると判断される。表-1を見ると含水比15%、20%、25%のCase.1よりCase.2の標準偏差の方が小さいため、テフロンシートによる一軸圧縮強度の分散を低減できていると考えられる。

次に、テフロンシートを用いることによる供試体の破壊形状の改善が見られるか検討した。なお含水比25%の場合については、写真-3に示すように、写真-3(a)の含水比25%の供試体は完全に自立することが出来ていなかったため、含水比5%~20%の試験データで確認した。Case.1のとき、写真-1(b)の破壊形状が全体の12%を占めていたが、Case.2に関しては、写真-1(b)のような破壊形状は確認されなかった。したがって、一軸圧縮試験の際にテフロンシートを供試体の両端に使用することで、供試体の破壊形状の改善が見られた。また強度と分散の検定が逆の結果になった考察を行った。含水比の低い範囲はテフロンシートによって端面摩擦が軽減され一軸圧縮強度の平均が増加したが、含水比の高い範囲は供試体が十分な水を含んでいる為、端面摩擦の影響が少なく強度に影響をあまり及ぼさなかったと考える。分散については、写真-1(b)の破壊形状が多く観察されたのが、含水比15%、20%であり、テフロンシートの効果によって破壊形状が改善されたため分散が低減できたと考える。

4. おわりに

本研究では、締固められた不飽和土の一軸圧縮強度のより精度の高い試験データ蓄積のために、一軸圧縮試験の際にテフロンシートを供試体の端面に使用した試験結果に与える影響について統計的分析を行った。その結果、端面摩擦の軽減により供試体の破壊形状が改善され、含水比5%、10%、25%の一軸圧縮強度の平均の増加、含水比15%、20%、25%の一軸圧縮強度の分散の低減ができたことと分析された。テフロンシートの効果の分析として、強度の平均については強度が比較的低い範囲で効果が高く、強度の分散については強度が比較的高い範囲で効果が高いことがわかった。

4. おわりに

本研究では、締固められた不飽和土の一軸圧縮強度のより精度の高い試験データ蓄積のために、一軸圧縮試験の際にテフロンシートを供試体の端面に使用した試験結果に与える影響について統計的分析を行った。その結果、端面摩擦の軽減により供試体の破壊形状が改善され、含水比5%、10%、25%の一軸圧縮強度の平均の増加、含水比15%、20%、25%の一軸圧縮強度の分散の低減ができたことと分析された。テフロンシートの効果の分析として、強度の平均については強度が比較的低い範囲で効果が高く、強度の分散については強度が比較的高い範囲で効果が高いことがわかった。

参考文献

- 1) R. Kitamura and K. Sako: Unsaturated Soil Mechanics with Probability and Statistics, CRC Press, pp.59-95, 2019.
- 2) 赤鹿敬尚, 慶田佑太, 伊藤真一, 酒匂一成: 締固められた不飽和土の強度を求める試験方法の妥当性評価と誤差評価, 令和2年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集, pp.423-424, 2021.
- 3) 地盤工学会編: 地盤材料試験の方法と解説, 第5編 安定化試験, 第2章 突固めによる土の締固め試験, pp.373-385, 2009.

表-1 一軸圧縮強度の平均と標準偏差

		設定含水比				
		5%	10%	15%	20%	25%
Case.1	平均	47.4	96.4	96.9	64.4	24.3
	標準偏差	15.3	20.4	16.1	13.4	10.4
Case.2	平均	81.5	127.9	101.7	64.1	17.6
	標準偏差	16.3	20.4	8.6	8.8	2.5

表-2 統計値  $u$

	設定含水比				
	5%	10%	15%	20%	25%
統計値 $u$	7.04	4.89	0.93	-0.06	-2.01

表-3 不偏分散

		設定含水比				
		5%	10%	15%	20%	25%
Case.1( $n=100$ )	$v_1$	236.78	421.78	261.81	180.12	109.86
Case.2( $n=10$ )	$v_2$	294.17	462.64	85.22	85.66	6.81
$F$		1.24	1.10	3.07	2.10	16.13



(a) (b)

写真-3 含水比25%と5%の供試体