

含水比と土粒子の密度試験における不確かさの算定

松江工業高等専門学校 学生会員 井上 紘一
松江工業高等専門学校 正会員 河原 莊一郎

1. はじめに

土質試験など各種の試験結果には、たとえ正確に測定されたものであっても誤差やばらつきが必ず含まれている。不確かさとは精度に関する用語であり、通常「GUM」に則ってその要因の抽出や実際の計算を行う。しかしながら土質試験においてはあまり浸透していないのが現状である。

そこで、本研究では土質試験において基礎的な試験である含水比試験と土粒子の密度試験においてそれぞれ条件を変更させ、不確かさへの影響を調査した。

2. 実験概要

含水比試験に関しては粘性土で2種類、砂質土で3種類使用し、また、土粒子の密度試験に関しては土(砂質土)を使用した。

まず、含水比試験に関してはそれぞれの土の自然含水比をあらかじめ調査して目標含水比を決める。そして土を絶乾状態として目標含水比より逆算した水の量を加えて含水比を求める。これにより求めた含水比の値を「GUM」に則って不確かさを求める。

表1 含水比の検証実験の内容

サンプル数	各要因	測定者	サンプル量	乾燥時間
5	A	A	約30g	18時間
5		B		
5		C		
5	A	A	約20g	18時間
5			約30g	
5			約40g	
5	A	A	約30g	12時間
5				18時間
5				24時間
5	A	A	約30g	18時間
5				
5				

ただし、測定者 B、C に関しては同じ研究室の人に実験をしてもらい、乾燥時間は乾燥炉内の静置時間である。

次に、土粒子の密度試験については、土は気乾状態(w=6.5%)のものを使用し「GUM」に則って不確かさを求める。今回は、測定者、サンプル量、煮沸時間についてそれぞれ条件を変更させ不確かさの影響を調べた。ただし、測定者については14人のデータ(各人3個)をとり、

サンプル量に関しては10g、20g、30gとそれぞれ5個ずつのサンプルで行う。また、煮沸時間についても20分、40分、60分と同様に5個ずつのサンプルで検証した。ただし、煮沸時間は沸騰していない状態でピクノメーターを湯せん器具の中に入れ沸騰してから計測した時間である。また、電子天秤の秤量は310g、感量は0.0001gである。

3. 標準不確かさの計算結果 含水比試験

表2に粘性土1(細粒分67.1% 粗粒分32.9%)の土の含水比試験の測定結果を示す。

表2 測定者の違いによる含水比測定結果

測定者	サンプルNO						全平均
	1	2	3	4	5	平均値	
A	41.3589	41.6636	41.3608	41.5728	41.2597	41.4432	41.1737
B	40.9918	41.0331	40.4048	40.9872	41.2459	40.9326	
C	40.8293	41.2690	40.5130	41.6287	41.4875	41.1455	

この表に分散分析を適応し、例として粘性土1の土での標準不確かさを求める。

表3の「グループ間変動(A)」は各グループの平均値と全平均との差の二乗に繰り返した回数をかけて合計したものである。また「グループ内変動(e)」はグループごとの偏差の二乗和である。「自由度(f)」は統計学的には独立変数の個数(変数の数－関係式の数)である。「分散(V)」は不偏分散であり、グループ間分散 $V_A=S_A/f_A$ 、グループ内分散は $V_e=S_e/f_e$ として計算する。

表3 粘性土1の含水比の分散分析表

粘性土1	測定者		
	変動(S)	自由度(f)	分散(V)
グループ間(A)	0.6577	2	0.3289
グループ内(e)	1.3720	12	0.1143
合計(T)	2.0297	14	
サンプル量			
変動要因	変動(S)	自由度(f)	分散(V)
グループ間(A)	0.2196	2	0.1098
グループ内(e)	0.6072	12	0.0506
合計(T)	0.8268	14	
乾燥時間			
変動要因	変動(S)	自由度(f)	分散(V)
グループ間(A)	1.1614	2	0.5807
グループ内(e)	1.0848	12	0.0904
合計(T)	2.2462	14	

分散分析表より測定者の違いによる標準偏差 σ_A を求め

る。また、 n は繰り返し回数で 5 である。 $\sigma_A = u_{op}(w)$

$$\sigma_A = \sqrt{\frac{(V_A - V_e)}{n}} = \sqrt{\frac{(0.3289 - 0.1143)}{5}} = 0.2017[\%]$$

また、試料の違いの標準偏差を σ_e とし、これは測定の繰り返しの標準偏差である。

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{1.3720 + 0.6072 + 1.0848}{12 + 12 + 12}} = 0.2917[\%]$$

含水比試験では普通 3 個のサンプルの平均値を最終結果とするので標準不確かさを求める式は次式となる。

$$u_{RH}(w) = \sigma_e / \sqrt{3} = 0.1684[\%]$$

ここで感度係数についてだが、表 4 の①と④に関しては検証実験においてそれぞれの要因が与える含水比の標準不確かさを示しているため 1 となる。また②と③は実験結果より線形近似式の勾配を感度係数とする。乾燥時間の感度係数を以下に示す。

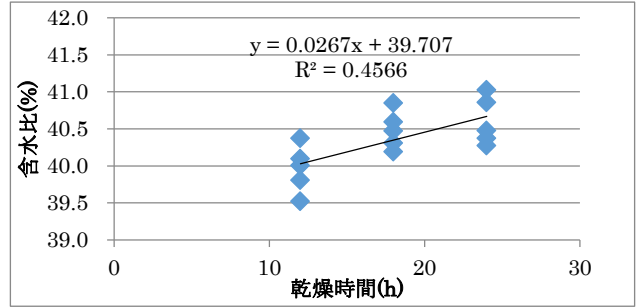


図 1 粘性土の乾燥時間の感度係数

図 1 の近似式の傾きより感度係数が求められ、今回の場合は 0.0267 となる。

ここで、乾燥時間のばらつきは 12 時間～24 時間の間で平均 18 時間、半値幅 $a=6$ 時間の一樣分布に従うものとして、乾燥時間 t の標準不確かさ $u(t)$ は一樣分布の標準偏差から次のように求められる。②も同様にして求める。

$$u(t) = a / \sqrt{3} = 6 / \sqrt{3} = 3.4641[h]$$

乾燥時間の違いによる含水比の標準不確かさを求める式は次式となる。

$$u_{DR}(w) = |C_{DR}| \cdot u(t) = 0.0267 \times 3.4641 = 0.0925[\%]$$

表 4 粘性土 1 の含水比のバジェットシート

番号	要因	標準不確かさ $u(x)$	感度係数 $ C_x $	標準不確かさ $u(w) = C_x \cdot u(x)$	寄与率 $R_x[\%]$
①	測定者の違い	0.2017 [%]	1	0.2017	52.2
②	サンプル量の違い	5.7735 [g]	-0.00340 [%/g]	0.0196	0.5
③	乾燥時間の違い	3.4641 [h]	0.0267 [%/h]	0.0925	11.0
④	試験の繰り返し サンプルの違い	0.1684 [%]	1	0.1684	36.3
⑤	合成標準不確かさ $u_c(w)$			0.2793	
⑥	拡張不確かさ $U(w) = k \cdot u_c(w)$			0.5585	

合成標準不確かさは①～④の標準不確かさの二乗和の

平方根として求められ、拡張不確かさは包含係数を乗じたものである。包含係数は信頼度 95%の区間を表す $k=2$ を用いる。つまり粘性土 1 の土の含水比 w の表記の仕方は次式となる。

$$w = 41.0 \pm 0.56[\%] \quad (k=2)$$

なお、他の土の結果を以下に示す。

粘性土 2 $w = 35.8 \pm 1.62[\%]$ (細粒分 53.3% 粗粒分 46.7%)

砂質土 1 $w = 43.9 \pm 6.44[\%]$ (細粒分 39.2% 粗粒分 60.8%)

砂質土 2 $w = 38.1 \pm 2.42[\%]$ (細粒分 33.2% 粗粒分 66.8%)

砂質土 3 $w = 11.6 \pm 1.60[\%]$ (細粒分 44.0% 粗粒分 56.0%)

という結果となった。なお寄与率をみると、いずれも測定者による影響が大きかった。

4. 標準不確かさの計算結果 土粒子の密度試験

含水比の拡張不確かさと同様の手順で求めた。土粒子の密度の不確かさのバジェットシートを表 5 に示す。

表 5 土粒子の密度のバジェットシート

番号	要因	標準不確かさ $u(x)$	感度係数 $ C_x $	標準不確かさ $u_c(\rho_s) = C_x \cdot u(x)$	寄与率 $R_x[\%]$
①	測定者の違い	0.0154 [g/cm^3]	1	0.0154	37.0
②	サンプル量の違い	5.7735 [g]	0.00181 [$\text{g}/(\text{cm}^3 \cdot \text{g})$]	0.0104	17.0
③	煮沸時間の違い	11.5470 [min]	0.000236 [$\text{g}/(\text{cm}^3 \cdot \text{min})$]	0.0024	0.9
④	試験の繰り返し サンプルの違い	0.0170 [g/cm^3]	1	0.0170	45.1
⑤	合成標準不確かさ $u_c(\rho_s)$			0.0252	
⑥	拡張不確かさ $U(\rho_s) = k \cdot u_c(\rho_s)$			0.0505	

したがって、土粒子の密度の表記の仕方は次式となる。

$$\rho_s = 2.662 \pm 0.051[\text{g}/\text{cm}^3]$$

土粒子の密度試験に関しては試験の繰り返しによる違いの影響が大きかった。

5. おわりに

含水比試験では寄与率でみると、粘性土と砂質土ともに不確かさの大きさに差はあるものの、測定者の違いによる影響が大きく表れた。既往の研究¹⁾では $w = 43.4 \pm 1.0[\%]$ という結果となっており、今回は粘性土 1 を除き大きな値になったといえる。これは、日によって初期含水比が変化したのが原因の一つと考えられる。今後は、測定者の違いの条件をもっと厳密にする必要がある。

土粒子の密度試験については、土試料の持つ不均質性に基づくものであると考えられる。今後は試験に供する試料土の取り扱い方やサンプルの分取方法に注意、工夫をする必要がある。

参考文献

- 1) 澤孝平：「不確かさ」のすすめ，第 46 回地盤工学研究発表会 CD，DS-9 資料，2011