

土質試験結果の不確かさに及ぼす試料の不均質性の影響

関西地盤環境研究センター 正会員 ○澤 孝平 正会員 中山 義久
萩家 正次 正会員 楠本奈津子

1. まえがき 土質試験においては、ふつう採取された試料土からいくつかのサンプルを分取し、それらの試験結果の平均値が最終試験結果として報告される。サンプルの数は試験により異なるが、一般的には3個が多い。一方、2008年より本格化した試験機関の認定制度において、認定される試験所は自己の試験結果の精度（JISでは「不確かさ」という）を明示することが義務付けられている。この不確かさの算定においては、試験の再現性を加味するため繰返し試験に基づくばらつきを評価する必要がある。多くの強度試験などサンプルを繰返し使用できない試験や炉乾燥・水浸過程による試験結果の不確かさを検証する場合には、サンプルの違い（すなわち、試料土の不均質性）が不確かさに影響することになる。

本文は、関西地盤環境研究センターが試験所認定時に実施した試験結果の不確かさ算定の検証実験及び産総研不確かさクラブにおける事例研究の成果から、試料の不均質性が試験結果の不確かさに与える影響を検討する。

2. 不確かさ算定における試料土の不均質性の評価方法 試験結果の不確かさの算定は、(1)不確かさに影響する要因の抽出、(2)既存の資料や検証実験結果から各要因の試験結果に及ぼす程度（標準不確かさ）の算出、(3)標準不確かさの合成、(4)合成標準不確かさの拡張の手順に進められる。とくに、(1)要因の抽出が重要であり、本文では土の試験項目に必須の「測定機器」、「測定者の違い」、「試験の繰返し」及び「サンプルの違い」を取り上げる。この内、サンプルの違いが試料土の不均質性に関係する要素であり、これに注目すると、次の2つの不確かさ評価方法がある。

【1】別サンプルでの繰返し（表-1(a)）：測定者3名が3回ずつ試験を繰り返す場合、合計9個のサンプルを分取して9個の試験結果を求める。これを一元配置の分散分析により解析し、測定者の違い及び試験の繰返しに基づく標準偏差を算出し、標準不確かさとする。サンプルの違いの影響は試験の繰返しと交絡して求められるため、試料の不均質性の影響だけを評価することは難しい。

【2】同一サンプルでの繰返し（表-1(b)）：測定者3名が3回ずつ試験を繰り返す場合、1個のサンプルを繰返し使用して9個の試験結果を求める。サンプルの違いを評価するためには、これを3個のサンプルで実施し、合計27個の試験結果から、二元配置の分散分析により、測定者の違い、サンプルの違い及び試験の繰返しに基づく標準偏差を算出する。二元配置の分散分析では、測定者とサンプルの交互作用が求められるが、両者の交互作用はないと考え、試験の繰返しに合算して評価することが多い。

3. 結果と考察

3.1 標準不確かさとその寄与率による不均質性の評価

表-2は含水比試験における要因ごとの標準不確かさとその寄与率を示している。ここで、寄与率 R_i とは合成標準不確かさ $u_c(X)$ に占める各要因 i の標準不確かさ $u_i(X)$ の割合を百分率で表したものである。標準不確かさは二乗和により合成するので、寄与率も標準不確かさの二乗の割合として、次式で算出する。

$$R_i = \frac{u_i^2(X)}{u_c^2(X)} \times 100(\%) \tag{1}$$

表-2の別サンプルでは、5名の測定者が5回ずつ繰返し試験をしており、25個のサンプルを試験している。一方、同一サンプルは1つのサンプルを3名が3回ずつ試験し、これを3個のサンプルで繰り返した。秤の校正による標準不確かさはどちらも小さいので無視すると、同一サンプルではサンプルの違いの寄与率が大きく、不確かさの大部分はサンプルの違いによるものである。別サンプルの合成標準不確かさが同一サンプルの約2倍であり、測定者の違いの寄与率も大きく、サンプルの違い（試料の不均質性）がこれらに反映していると考えられる。

キーワード 試験精度、不確かさ、試料の不均質性、標準偏差、寄与率

連絡先 〒566-0042 大阪府摂津市東別府 1-3-3 (協) 関西地盤環境研究センター TEL. 06-6827-8833

表-1 不確かさの検証実験結果

(a) 別サンプルでの繰返し

繰返し回数	測定者		
	A	B	C
1回目	サンプル数：9個 試験結果：9個		
2回目			
3回目			

(b) 同一サンプルでの繰返し

サンプル	繰返し回数	測定者		
		A	B	C
1	1回目			
	2回目			
	3回目			
2	1回目	サンプル数：3個 試験結果：27個		
	2回目			
	3回目			
3	1回目			
	2回目			
	3回目			

表-2 含水比試験の結果

要因		別サンプル		同一サンプル	
		標準不確かさ u _i (w) (%)	寄与率 R _i (%)	標準不確かさ u _i (w) (%)	寄与率 R _i (%)
秤の校正	m _a 用	0.042642	0.6	0.026248	1.1
	m _b 用	0.061150	1.3	0.037032	2.3
	m _c 用	0.018508	0.1	0.010784	0.2
測定者の違い		0.359166	44.5	0.069614	8.0
サンプルの違い		0.393531	53.4	0.229956	87.8
試験の繰返し				0.018157	0.5
合成標準不確かさ u _c (w)		0.5383		0.2454	
拡張不確かさ U(w) (k=2)		1.1		0.5	
試験結果の表示 (k=2)		w=43.4±1.1%		w=41.1±0.5%	

表-3は土粒子密度試験,表-4は粒度試験の4.75mmの通過質量百分率の標準不確かさとその寄与率を表している。表-3では同一サンプルの試験の繰返しの寄与率がかなり大きいこと,表-4では別サンプルの測定者の寄与率が小さいことなど,若干の違いがあるが,サンプルの違い(試料の不均質性)の寄与率が高いことには変わらない。

表-3 土粒子密度試験の結果

要因		別サンプル		同一サンプル	
		標準不確かさ $u_i(\rho_s)$ (g/cm ³)	寄与率 R_i (%)	標準不確かさ $u_i(\rho_s)$ (g/cm ³)	寄与率 R_i (%)
秤の校正	m用	0.000511	0.7	0.000511	1.7
	m _b 用	0.000077	0.0	0.000077	0.0
	m _s 用	0.000077	0.0	0.000077	0.0
	m _t 用	0.000054	0.0	0.000054	0.0
温度計の校正	T用	0.000121	0.0	0.000121	0.1
	T'用	0.000149	0.1	0.000149	0.1
測定者の違い		0.003105	25.0	0.000000	0.0
サンプルの違い		0.005344	74.2	0.002804	50.0
試験の繰返し				0.002746	48.0
合成標準不確かさ $u_c(\rho_s)$		0.0062		0.0040	
拡張不確かさ $U(\rho_s)$ (k=2)		0.012		0.008	
試験結果の表示 (k=2)		$\rho_s = 2.605 \text{ g/cm}^3 \pm 0.012 \text{ g/cm}^3$		$\rho_s = 2.651 \text{ g/cm}^3 \pm 0.008 \text{ g/cm}^3$	

表-4 粒度試験の結果 (4.75mmの通過質量百分率)

要因		別サンプル		同一サンプル	
		標準不確かさ $u_i(P)$ (%)	寄与率 R_i (%)	標準不確かさ $u_i(P)$ (%)	寄与率 R_i (%)
秤の校正	全試料質量	0.000151	0.0	0.000173	0.0
	残留試料質量	0.000450	0.0	0.000499	0.0
ふるいの校正		1.074030	4.3	1.074030	19.3
測定者の違い		0.000000	0.0	0.307590	1.6
サンプルの違い		5.091248	95.7	2.170477	78.9
試験の繰返し				0.109510	0.2
合成標準不確かさ $u_c(P)$		5.2033		2.4436	
拡張不確かさ $U(P)$ (k=2)		10.41		4.89	
試験結果の表示 (k=2)		$P = 66.51\% \pm 10.41\%$		$P = 65.33\% \pm 4.89\%$	

表-5 一軸圧縮試験の結果

要因		測定者:5名 試験の繰返し回数:10回 サンプル総数:50個		測定者:3名 試験の繰返し回数:3回 サンプル総数:9個	
		標準不確かさ $u_i(q_u)$ (kN/m ²)	寄与率 R_i (%)	標準不確かさ $u_i(q_u)$ (kN/m ²)	寄与率 R_i (%)
ノギスの校正	高さ	0.00291	0.0	0.002230	0.0
	直径	1.06488	0.7	0.126475	0.1
ダイヤルゲージの校正		0.01121	0.0	0.001418	0.0
ロードセルの校正		2.49379	3.8	2.351187	24.8
測定者の違い		0.00000	0.0	0.000000	0.0
サンプルの違い +試験の繰返し		12.44963	95.5	4.097651	75.2
合成標準不確かさ $u_c(q_u)$		12.742		4.726	
拡張不確かさ $U(q_u)$ (k=2)		25.5		9.5	
試験結果の表示 (k=2)		$q_u = 887.4 \text{ kN/m}^2 \pm 25.5 \text{ kN/m}^2$		$q_u = 105.4 \text{ kN/m}^2 \pm 9.5 \text{ kN/m}^2$	

表-5は一軸圧縮試験における一軸強度の結果である。強度試験は必ず供試体を破壊させるため,同一のサンプルでの試験は不可能であり,表-5の結果もすべて別サンプルのものである。従って,サンプルの違いと試験の繰返しの影響を分離することができないが,他の試験結果から類推すると,サンプルの違い(試料の不均質性)の影響はかなり大きいと考えて良い。

3.2 標準偏差による不均質性の評価 粒度試験のふるい分け試験において,砂質礫試料を用いて表-1の(a), (b)とともに,同一サンプルによる7回の繰返し試験を行った。同一サンプルのふるい分けの繰返しでは,一度ふるい分けたサンプルを集めて再度ふるい分けるので,サンプルの散逸やふるい目の目詰まりなどのため全く同じサンプルではないが,ここではこれを同一サンプルとして扱っている。表-1(b)の方法を「同一サンプルA」,7回の繰返し法を「同一サンプルB」と呼ぶ。別サンプルの結果は一元配置の分散分析,同一サンプルAの結果は二元配置の分散分析によりサンプルの違いと試験の繰返しに関する標準偏差を求める。同一サンプルBについては7個の試験結果から標準偏差を求める。粒径ごとの通過百分率の平均値と標準偏差は表-6である。

表-6 ふるい分け試験におけるサンプルの違いの影響

試験の種類	別サンプル		同一サンプルA			同一サンプルB	
測定者数	3名		3名			1名	
繰返し回数	3回		サンプルごとに3回			7回	
サンプル数	9個		3個			1個	
粒径 (mm)	通過質量百分率 (%)		通過質量百分率 (%)			通過質量百分率 (%)	
	平均値	標準偏差 (サンプル+繰返し)	平均値	標準偏差 (サンプル)	標準偏差 (繰返し)	平均値	標準偏差 (繰返し)
19.0	100.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00	0.00
9.50	83.59	4.74	84.34	1.62	0.21	80.70	0.10
4.75	66.51	5.09	65.33	2.17	0.11	66.50	0.13
2.00	45.97	0.97	39.95	0.29	0.05	45.77	0.16
0.850	21.77	2.85	18.88	1.72	0.08	20.83	0.05
0.425	7.10	2.18	5.29	1.05	0.03	6.46	0.08
0.250	3.97	1.39	2.58	0.66	0.03	3.83	0.09
0.106	0.62	0.26	0.28	0.09	0.02	0.76	0.10
0.075	0.12	0.08	0.02	0.00	0.01	0.11	0.11

表-6によると,別サンプルの試験結果から求められる標準偏差は,サンプルの違いと試験の繰返しが交絡したものであり,その値は同一サンプルのものに比べてかなり大きい。同一サンプルBは試験の繰返しの影響だけを表しており,標準偏差は極めて小さい。また,同一サンプルAではサンプルの違いと試験の繰返しが分離でき,試験の繰返しの標準偏差は小さい。従って,別サンプルで求まる大きな標準偏差の原因は,サンプルの違い(試料の不均質性)によるものであると考えられる。粒度試験の技能試験¹⁾において現れた試験機関間の大きな偏差にも,今回のようなサンプルの違いによるばらつきと同様のものがかなりの割合を占めていると考えられる。

4. あとがき 試験結果の不確かさ評価におけるサンプルの違いによる影響と試験の繰返しの影響について検討したところ,サンプルの違いが試験結果の不確かさに大きく影響することが分かった。これは土試料の持つ不均質性に基づくものであり,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・工夫をして,試料土を代表する均質なサンプルの分取に気を遣うべきであることを示唆している。

参考文献 1) 井上・澤井:土の基礎的な試験結果の精度・信頼性の現状分析,地盤の環境・計測技術に関するシンポジウム2006論文集,地盤工学会関西支部,pp.31-36.