

土样比重的测量不确定度评定

陈大庆, 慎乃齐, 李光禄, 张志国, 陈 剑

(中国地质大学(北京)工程技术学院, 北京 100083)

[摘 要]土样比重的测量不确定度既判定了自身的可靠性,同时又影响了通过比重及其他一些参数换算得到的孔隙率、饱和度等指标的准确性。选用物理性质较为均匀的原状粉土做样品,基于《土工试验方法标准》(GB/T50123-1999),通过比重瓶法重复测量了样品的比重。根据《测量不确定度评定与表示》(JJF 1059-1999)的要求,分析了试验过程中影响因素的主要来源,建立了测量比重不确定度的计算模式,较系统地对其不确定度进行了评定。结果表明:土的比重测量误差主要由称量及不均匀性两个因素引起。试验条件下的土样比重测量结果的扩展不确定度为0.005。

[关键词]比重 比重瓶法 标准不确定度 扩展不确定度

[中图分类号]TU441.2 **[文献标识码]**A **[文章编号]**0495-5331(2013)03-0523-5

Chen Da-qing, Shen Nai-qi, Li Guang-lu, Zhang Zhi-guo, Chen Jian. Evaluation of measurement uncertainty for specific gravity tests of soil samples[J]. *Geology and Exploration*, 2013, 49(3): 0523-0527.

1 引言

测量不确定度是表征合理地赋予被测量之值的分散性与测量结果相联系的参数。它是评定测量水平的指标,也是判定测量结果可靠性的依据。随着我国计量领域的标准化、规范化建设,1999年国家质量技术监督局颁布了《测量不确定度评定与表示》,为测量不确定度理论在计量部门的推广和应用奠定了基础(李慎安等,1999)。近些年来,一些学者及研究单位对有关测试仪器及试验指标的测量不确定度开展了研究,取得了一些成果。高鸿等(2011)对热轧带肋钢筋拉伸试验测量结果的不确定度进行了评定,求出测量重复性对测试结果影响最大;成琮等(2009)对土壤中 ^{90}Sr 测量的不确定度进行了评估,指出对测量结果的不确定度贡献最大的是 β 放射性测量;梁曦(2009)推导出桩基高应变试验凯司法的测量不确定度表达式,验证了在有效动静对比验证资料的基础上,该表达式能够满足工程的需要;傅辉清(2002)对经纬仪检定装置测量不确定度进行了分析与计算,证明了JSJ-ZB装置符合国内外各等级经纬仪室内检定要求等(Willink,

2005; Désenfant *et al.*, 2006; Pereira *et al.*, 2006; 孙志强等, 2008; 张梅静等, 2008; 彭和平等, 2008; 徐锐光等, 2010; Martins *et al.*, 2011; 刘海华, 2012; 王建英, 2012)。这些研究在评定测试仪器及其参数的测量水平、提高测量结果的可靠度方面发挥了积极作用。在土工性质测试领域,由于土样的非均匀性,测试中的影响因素复杂多样,故土工参数测量不确定度评定尚无标准可循,其研究成果也尚不多见。比重(也称土粒相对密度)是土的三个基本比例指标之一,是确定不同条件下土的密度、孔隙率、饱水性等指标不可或缺的参数,是分析评价土样工程的一个重要指标(李树芳, 2012)。本文根据《测量不确定度评定与表示》的要求,对土样比重测量结果的不确定度评定进行了探讨,力求为土工试验结果不确定度评定提供参考及借鉴。

2 试验依据及方法

本文以粉土为例,取一桶性质较为均匀的原状粉土做试验样品。根据国标《土工试验方法标准》,采用比重瓶法进行比重测定(盛树馨等, 1999; 金逢锡等, 2000)。具体试验方法是:

[收稿日期] 2011-12-17; **[修订日期]** 2012-06-28; **[责任编辑]** 郝情情。

[基金项目] 国家自然科学基金项目“金沙江上游晚更新世以来泥石流发育史与环境变迁”(编号 40901005)资助。

[第一作者] 陈大庆(1987年-),男,在读硕士,主要从事岩土和地质工程的研究。E-mail: 407303001@qq.com。

(1) 将土样及洗净的比重瓶在 105℃ 下烘干, 取出冷却后, 测量瓶的质量 m_b 。

(2) 称烘干土样约 15g, 通过漏斗装入烘干的比重瓶中, 然后在 EL-410D 型电子天平上称得瓶加土的质量 m_{bs} , 减去瓶的质量 m_b , 即得土样质量 m_s 。

(3) 将蒸馏水注入装有土样的比重瓶中, 水至瓶一半处, 然后采用真空抽气法排除土样中的空气。

(4) 将蒸馏水注入比重瓶至近满, 待瓶内悬液澄清后塞上瓶塞, 使多余的水自毛细管中溢出; 然后将比重瓶置于恒温水槽 (30℃), 待温度稳定且瓶内上部悬液澄清, 取出比重瓶。将瓶外水分擦干净后称量, 得瓶、水和土的质量 m_{bws} 。

(5) 洗净比重瓶, 灌满蒸馏水加盖, 恒温 (30℃) 后擦净瓶外水分称量, 得瓶加水的质量 m_{bw} 。

(6) 按式(1)计算土样的比重。

$$G = \frac{m_{bs} - m_b}{m_{bw} + m_{bs} - m_b - m_{bws}} \cdot G_{wt} \quad (1)$$

式中, m_{bs} 为瓶加土的质量, m_b 为瓶的质量, m_{bws} 为瓶加水加土的质量, m_{bw} 为瓶加水的质量, G_{wt} 为 t ℃ 时水的比重, 查物理手册。

粉土的 15 份土样比重测量结果列于表 1。

表 1 土样比重的测量结果

Table 1 Measurement results of specific gravity for soil samples

试样编号	m_{bs}/g	m_b/g	m_{bws}/g	m_{bw}/g	G
1	55.013	40.121	144.957	135.585	2.698
2	54.970	39.910	145.078	135.584	2.706
3	55.810	40.748	144.584	135.091	2.705
4	54.281	39.121	143.970	134.415	2.705
5	56.194	41.051	146.771	137.237	2.700
6	56.278	41.107	143.975	134.415	2.704
7	57.732	42.690	148.760	139.285	2.702
8	57.760	42.751	146.531	137.070	2.705
9	58.241	42.911	145.089	135.429	2.704
10	59.195	44.051	146.600	137.070	2.698
11	55.058	40.103	148.037	138.625	2.698
12	59.542	44.308	144.689	135.095	2.701
13	54.352	39.298	148.103	138.624	2.700
14	55.926	40.826	148.148	138.635	2.703
15	59.360	44.243	143.941	134.415	2.704
均值					2.702

3 土样比重测量的影响因素分析

从上述土样比重测试过程可以看出, 影响其测量结果的主要因素有土样的均匀性、质量称量上的偏差以及使用试验设备如烘箱、抽气机和恒温水槽等可能带来的误差。

由于土样的生成环境及沉积历史的差异, 对于工程场地同一部位所取的原状土样, 其微观结构的非均匀性会导致土样比重测量结果的差异, 这种差异可以直接利用若干个土样的比重测量结果进行统计分析, 属于 A 类测量不确定度评定。

根据不确定度传播律, 通过(1)式可分析出, 物体质量称量上的偏差势必会导致比重测量的误差, 其中包括瓶加土质量称量、瓶质量称量、瓶加水加土质量称量以及瓶加水质量称量等四个相互独立的环节, 属于 B 类测量不确定度评定。另外试验数据的舍入修约, 也会影响土样比重测量结果的准确性, 同属于 B 类测量不确定度评定。

在土样比重试验中, 用到了烘箱、抽气机和恒温水槽三个主要设备。鉴于一批土样是置于同一烘箱内, 在规范规定的温度 (105℃) 下同时烘干; 比重瓶是置于同一抽气设备在规范规定的条件下 (真空表读数接近当地一个大气负压值, 抽气时间不少于 1h) 同时抽气, 置于同一恒温水槽在同一温度 (30℃) 下同时恒温, 因此土样的烘干、抽气和恒温三个过程对测量结果的影响均可忽略不计。

综上所述, 影响土样比重测量准确性的主要因素列于表 2。

表 2 影响土样比重测量结果不确定度的主要因素

Table 2 Main factors affecting measurement accuracy of specific gravity for soil samples

序号	影响因素	代号	不确定度类型
1	样品不均匀性	n	A 类
2	瓶加土质量称量偏差	bs	B 类
3	瓶质量称量偏差	b	B 类
4	瓶加水加土质量称量偏差	bws	B 类
5	瓶加水质量称量偏差	bw	B 类
6	比重测量值数据修约	δ	B 类

4 标准不确定度分量评定

4.1 样品不均匀性的标准不确定度

根据以上 15 个土样的测试数据对其比重测量进行 A 类不确定度评定。土样不均匀性测量的不

确定度 u_n 采用贝赛尔法按式(2)进行评定:

$$u_n = \sqrt{\frac{1}{x(x-1)} \sum_{i=1}^x (G_i - \bar{G})^2} \quad (2)$$

式中, x 为土样比重试验样本数; G_i 为第 i 个土样的比重测定值; $\bar{G}$ 为土样比重测定结果的平均值。按式(2)计算, 因土样不均匀性导致的土样比重测量标准不确定度为:

$$u_n = 0.00073$$

4.2 称量的标准不确定度

根据不确定度传播律, 进行土样比重试验中由称量引起的 B 类不确定度评定。瓶加土质量称量偏差、瓶质量称量偏差、瓶加水加土质量称量偏差、瓶加水质量称量偏差主要由天平的精度决定。试验所用电子天平(EL-410D)检定结果显示, 称量范围在 0~100g 时, 实际分度值 $d=0.001\text{g}$, 检定分度值 $e=0.01\text{g}$, 天平最大允差 $m=0.008\text{g}$; 称量范围在 100~410g 时, 实际分度值 $d=0.001\text{g}$, 检定分度值 $e=0.01\text{g}$, 天平最大允差 $m=0.01\text{g}$ 。可取包含因子 $k=2$ (对应约 95% 的置信概率), 则天平称量的相对不确定度 u_r 为:

$$u_r = \begin{cases} \frac{m}{k} = 4 \times 10^{-3} \text{g} & (0 \sim 100\text{g}) \\ \frac{m}{k} = 5 \times 10^{-3} \text{g} & (100 \sim 410\text{g}) \end{cases}$$

首先, 对瓶加土质量称量偏差引起的不确定度进行计算。由测量仪器最大允许误差导致的不确定度按矩形分布估计(李慎安等, 1999), 对应的包含因子 $k=\sqrt{3}$ 。因此, 瓶加土质量 ($0 < m_{bs} < 100\text{g}$, u_r 取 $4 \times 10^{-3}\text{g}$) 的称量不确定度为:

$$u_{m_{bs}} = \frac{4 \times 10^{-3}}{k} = 2.31 \times 10^{-3} \text{g}$$

土样比重对瓶加土质量的灵敏系数按式(3)计算:

$$C_{m_{bs}} = \frac{\partial G_s}{\partial m_{bs}} = \frac{(m_{bw} - m_{bws}) \cdot G_{wt}}{(m_{bs} - m_b + m_{bw} - m_{bws})^2} \quad (3)$$

式中, 当温度为 30℃ 时, G_{wt} 取 0.996。瓶加土质量 m_{bs} 称量偏差导致的土样比重测量标准不确定度 u_{bs} 可由式(4)计算求出:

$$u_{bs} = |C_{m_{bs}}| u_{m_{bs}} = \frac{2.30 \times 10^{-3} (m_{bws} - m_{bw})}{(m_{bs} - m_b + m_{bw} - m_{bws})^2} \quad (4)$$

通过对式(4)的分析, 取 $(m_{bs} - m_b)$ 为各组土样比重试验数据中的最小值 $(m_{bs} - m_b)_{\min}$, 并取使得 $(m_{bws} - m_{bw})$ 的值最接近 $(m_{bs} - m_b)_{\min}$ 的数据。由此计算得到因瓶加土质量称量偏差导致的土样比重测量标准不确定度 u_{bs} 最大, 从而可以提高由 u_{bs} 所确定的误差区间对土样比重测量值分布的包容性。因此, 由瓶加土质量称量偏差导致的土样比重测量标准不确定度可由式(5)计算得出:

$$u_{bs} = |C_{m_{bs}}| u_{m_{bs}} = \frac{2.30 \times 10^{-3} (m_{bws} - m_{bw})}{[(m_{bs} - m_b)_{\min} + m_{bw} - m_{bws}]^2} \quad (5)$$

将表(1)所列试验数据代入式(5)计算得到:

$$u_{bs} = 0.00081$$

同理, 可分别求出瓶质量称量偏差、瓶加水加土质量称量偏差、瓶加水质量称量偏差引起的不确定度, 其计算公式及结果分别列于表 3。

由表 3 计算结果可知, 瓶加水加土质量以及瓶加水质量的称量偏差对试验结果不确定度的贡献较大。

表 3 称量的标准不确定度计算公式及结果

Table 3 Calculation formulas and results of the standard uncertainty caused by weighing

影响因素	称量不确定度 (g)	灵敏系数计算式	标准不确定度计算式	计算结果
m_{bs}	2.31×10^{-3}	$\frac{(m_{bw} - m_{bws}) \cdot G_{wt}}{(m_{bs} - m_b + m_{bw} - m_{bws})^2}$	$\frac{2.30 \times 10^{-3} (m_{bws} - m_{bw})}{[(m_{bs} - m_b)_{\min} + m_{bw} - m_{bws}]^2}$	0.00081
m_b	2.31×10^{-3}	$\frac{(m_{bws} - m_{bw}) \cdot G_{wt}}{(m_{bs} - m_b + m_{bw} - m_{bws})^2}$	$\frac{2.30 \times 10^{-3} (m_{bws} - m_{bw})}{[(m_{bs} - m_b)_{\min} + m_{bw} - m_{bws}]^2}$	0.00081
m_{bws}	2.88×10^{-3}	$\frac{(m_b - m_{bs}) \cdot G_{wt}}{(m_{bs} - m_b + m_{bw} - m_{bws})^2}$	$\frac{2.87 \times 10^{-3} (m_{bs} - m_b)}{[(m_{bw} - m_{bws})_{\min} + m_{bs} - m_b]^2}$	0.00137
m_{bw}	2.88×10^{-3}	$\frac{(m_{bs} - m_b) \cdot G_{wt}}{(m_{bs} - m_b + m_{bw} - m_{bws})^2}$	$\frac{2.87 \times 10^{-3} (m_{bs} - m_b)}{[(m_{bw} - m_{bws})_{\min} + m_{bs} - m_b]^2}$	0.00137

4.3 数值修约的标准不确定度

测量结果数据的舍入修约,同属于 B 类测量不确定度评定。根据土样比重数据修约规则(陈玉忠等,2008;孔昭俊,2011),其修约间隔 δ 为 0.001。由数据修约引起的土样比重测量标准不确定度 u_δ 为:

$$u_\delta = \frac{\delta}{2\sqrt{3}} = 0.00029$$

5 合成和扩展不确定度评定

5.1 合成标准不确定度

由于土样不均匀性、瓶加土质量称量偏差、瓶质量称量偏差、瓶加水加土质量称量偏差、瓶加水质量称量偏差和数据修约六个因素导致的土样比重测量不确定度分量 u_n 、 u_{bs} 、 u_b 、 u_{bws} 、 u_{bw} 、 u_δ 彼此独立,所以可按式(6)计算土样比重测量合成标准不确定度 u_c :

$$u_c = \sqrt{u_n^2 + u_{bs}^2 + u_b^2 + u_{bws}^2 + u_{bw}^2 + u_\delta^2} \quad (6)$$

将以上各不确定度分量带入式(6),求得:

$$u_c = 0.0025$$

5.2 扩展不确定度

扩展不确定度 U 与合成标准不确定度 u_c 之间的关系为:

$$U = k \cdot u_c \quad (7)$$

式(7)中, k 为包含因子, k 值与被测量的指标值的分布有关,假定检验结果符合正态分布,在 95% 置信概率时,取 $k = 2$,将计算出的 u_c 代入式(7),最后得到土样比重测量扩展不确定度为:

$$U = 0.0050$$

6 结论

根据国标《土工试验方法标准》及《数字修约规则》的规定,土样比重 G 的最终测量结果为:

$$G = 2.702 \pm 0.005$$

由此可得到出土样比重的相对不确定度是 1.84%。影响土样比重测定结果的不确定度因素较多,它们贡献的大小也各不相同。分析结果表明,瓶加水加土质量以及瓶加水质量的称量偏差对比重测量结果的影响相对较大,瓶加土质量称量偏差、瓶质量称量偏差以及土样不均匀性的影响次之,数据的修约影响相对较小。上述给出的比重测量的不确定度评定结果可供相同测试条件下的土的比重试验参考。

[References]

- Chen Yu-zhong, Yu Zhen-yuan, Feng Shi-yong. 2008. Rules of rounding off for numerical values & expression and judgement of limiting values[S]. Beijing: China National Institute of Standardization; 2-8 (in Chinese)
- Cheng Qiong, Jiang Shu-bin, Wen De-zhi, Ma Jun-ge. 2009. Evaluation of uncertainty for measurement result of ^{90}Sr in environmental soil samples[J]. Sichuan Environment, 28(5): 22-25 (in Chinese with English abstract)
- Désenfant M, Priel M. 2006. Road map for measurement uncertainty evaluation[J]. Measurement, 41: 841-848
- Fu Qing-hui. 2002. Analysis of the uncertainty in the measurement of theodolite verification device[J]. Journal of Geomatics, 27(4): 25-26 (in Chinese with English abstract)
- Gao Hong, Wang Tao. 2011. Evaluation of measurement uncertainty for tensile tests of hot rolled ribbed bars[A]. Proceedings of the 2011 conference on metallurgy of China Metrology Association[C]. Xi'an: Yejin Zidonghua; 123-126 (in Chinese with English abstract)
- Jin Feng-xi, Li Long-zhe. 2000. A few factors influencing the experimental results of measuring density of solid with pycnometer[J]. College Physical Experiment, 13(2): 59-60 (in Chinese with English abstract)
- Kong Zhao-jun. 2011. On arithmetic rounding[J]. Mathematical Theory and Applications, 31(2): 24-29 (in Chinese with English abstract)
- Li Shen-an, Shi Chang-yan, Liu Feng. 1999. Evaluation and expression of uncertainty in measurement[S]. Beijing: National Institute of Metrology; 1568-1592 (in Chinese)
- Liang Xi. 2009. Uncertainty analysis of CASE method of high-strain dynamic pile testing[J]. Construction Quality, 27(10): 18-21 (in Chinese with English abstract)
- Liu Hai-hua. 2012. Electronic weight scale evaluation of uncertainty measurement results[J]. Weighing Instrument, 41(4): 34-35 (in Chinese with English abstract)
- Li Shu-fang. 2012. Significance of soil test and in-situ test in engineering survey[J]. Shanxi Architecture, 38(9): 98-99 (in Chinese with English abstract)
- Martins M A F, Requi R, Kalid R A. 2011. Generalized expressions of second and third order for the evaluation of standard measurement uncertainty[J]. Measurement, 44: 1526-1530
- Pereira R, Barretto C F. 2006. Type B uncertainty in sound power measurements using comparison method[J]. Measurement, 39: 169-175
- Peng He-ping, Jiang Xiang-qian. 2008. Evaluation and management procedure of measurement uncertainty in new generation geometrical product specification (GPS)[J]. Measurement, 42: 653-660
- Sheng Shu-xin, Wu Lian-rong. 1999. Standard for soil test method[S]. Beijing: China Planning Press; 22-24 (in Chinese)
- Sun Zhi-qiang, Zhang Hong-jian, Zhou Jie-min. 2008. Evaluation of uncertainty in a vortex flowmeter measurement[J]. Measurement, 41: 349-356
- Willink R, Lira I. 2005. A united interpretation of different uncertainty in-

- tervals[J]. Measurement, 38(1): 61–66
- Wang Jian-ying. 2012. Analysis report about uncertainty of micrometer indication error measurement results[J]. Metrology & Measurement Technique, 39(4): 73–74 (in Chinese)
- Xu Rui-guang, Zhao Heng, Guo Yu-jian. 2010. Effect of uncertainty of electronic balance on the experimentation of constant weight[J]. Standard and Testing, 16(4): 18–21 (in Chinese with English abstract)
- Zhang Mei-jing, Chen Liang, Yao Ping. 2011. Uncertainty evaluation of soil density measurement[J]. Journal of Zhejiang Water Conservancy and Hydropower College, 23(1): 45–47 (in Chinese with English abstract)
- [附中文参考文献]
- 陈玉忠, 于振凡, 冯士雍. 2008. GB8170–2008, 数值修约规则与极限数值的表示和判定[S]. 北京: 中国标准化研究院: 2–8
- 成琼, 蒋树斌, 文德智, 马俊格. 2009. 土壤中⁹⁰Sr测量的不确定度评估[J]. 四川环境, 28(5): 22–25
- 傅辉清. 2002. 经纬仪检定装置测量不确定度分析[J]. 测绘信息与工程, 27(4): 25–26
- 高鸿, 汪涛. 2011. 热轧带肋钢筋拉伸试验测量结果不确定度评定[A]. 见: 中国计量协会冶金分会 2011 年会论文集[C]. 西安: 冶金自动化: 123–126
- 金逢锡, 李龙哲. 2000. 比重瓶测固体密度影响实验结果的因素[J]. 大学物理实验, 13(2): 59–60
- 孔昭俊. 2011. 论数值修约[J]. 数学理论与应用, 31(2): 24–29
- 李慎安, 施倡彦, 刘风. 1999. JJF1059–1999 测量不确定度评定与表示[S]. 北京: 中国计量科学研究院: 1568–1592
- 梁曦. 2009. 基桩高应变试验凯司法测量不确定度分析[J]. 质量检测, 27(10): 18–21
- 刘海华. 2012. 电子计重秤测量结果的不确定度评定[J]. 衡器, 41(4): 34–35
- 李树芳. 2012. 土工试验与原位测试在工程勘察中的重要性[J]. 山西建筑, 38(9): 98–99
- 盛树馨, 吴连荣. 1999. GB/T50123–1999, 土工试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社: 22–24
- 王建英. 2012. 千分尺示值误差测量结果的不确定度评定[J]. 计量与测试技术, 39(4): 73–74
- 徐锐光, 赵恒, 郭钰坚. 2010. 电子天平的不确定度对恒重试验的影响[J]. 标准检测, 16(4): 18–21
- 张梅静, 陈亮, 姚平. 2011. 基于土的密度试验测量的不确定度评定[J]. 浙江水利水电专科学校学报, 23(1): 45–47

Evaluation of Measurement Uncertainty for Specific Gravity Tests of Soil Samples

CHEN Da-qing, SHEN Nai-qi, LI Guang-lu, ZHANG Zhi-guo, CHEN Jian
(China University of Geosciences(Beijing), Beijing 100083)

Abstract: Measurement uncertainty for specific gravity tests of soil samples affects its reliability, and also influences the accuracy of porosity and saturation obtained by transforming specific gravity and other parameters. A pail of undisturbed silt was taken as the specimen. The specific gravity of soil samples was measured by the pycnometer method based on “Standard for soil test method” (GB/T50123–1999). According to requirements of “Uncertainty Evaluation and Denotation of the Measurement Results” (JJF 1059–1999), we analyzes the factors affecting measurement accuracy, then builds a calculation model for the measurement uncertainty, and then evaluates the measurement uncertainty for specific gravity of soil Samples. The result shows that the contribution to the uncertainty of the measurement results comes mainly from weighing and inhomogeneity. The expanded uncertainty of measurement results of the specific gravity of soil samples is 0.005 under the proposed testing conditions.

Key words: specific gravity, pycnometer method, standard uncertainty, expanded uncertainty