

DOI: 10.16285/j.rsm.2018.0721

考虑级配多样性的颗分试验取样质量理论研究

张 升^{1,2}, 乔春晖¹, 李 希¹, 沈 远³

(1. 中南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410072; 2. 中南大学 高速铁路建造技术国家工程实验室, 湖南 长沙 410072;
3. 中铁西安勘察设计研究院有限责任公司, 陕西 西安 710054)

摘 要: 颗粒分析试验被广泛应用于土木、水利水电和采矿等诸多工程中, 以确定材料的颗粒级配。但对于工程中常见的超大粒径填料合理取样质量问题, 尚缺少可依据的文献资料。将试样选取视为一种分层抽样过程, 结合抽样分析理论, 建立了能够确定样本容量的理论公式; 考虑到颗粒材料平均粒径与其级配分布的关系, 提出了一种为确定材料整体级配所需试样质量的通用方法。对不同级配分布情况开展了针对性试验, 验证了所提出方法的适用性。并将该方法应用于确定重庆江北机场和贵州龙洞堡机场填料的颗粒级配, 取得了良好效果。所得结果可为相关工程实践及规范的发展和完善提供参考。

关 键 词: 颗粒级配; 颗粒分析试验; 分层抽样; 大粒径问题

中图分类号: TU 441

文献标识码: A

文章编号: 1000—7598 (2019) 07—2555—08

Theoretical determination of the sieving mass by the gradation diversity

ZHANG Sheng^{1,2}, QIAO Chun-hui¹, LI Xi¹, SHEN Yuan³

(1. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha, Hunan 410072, China; 2. National Engineering Laboratory for High-Speed-Railway Construction, Central South University, Changsha, Hunan 410072, China;
3. Xi'an Railway Survey and Design Institute Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710054, China)

Abstract: Grain-size analysis is widely used to determine the particle size distribution (PSD) of materials in civil engineering, water conservancy and hydropower, and mining. However, there is limited information on the reasonable sample mass of super large-size fillers commonly used in engineering. Based on the theory of stratified sampling, a theoretical formula was established to obtain the sample capacity. A general method for determining the sample mass in the sieving test was proposed by considering the relationship between the average particle size of granular materials and its particle size distribution. Targeted tests were carried out to study the distributions of different gradations, and the reliability of the method was validated. The method was applied to determine the particle size distribution of the fillers used in Chongqing Jiangbei airport and Guizhou Longdongbao airport. Therefore, the proposed method provides references for the development and improvement of relevant engineering practices and specifications.

Keywords: particle size distribution; grain-size analysis; stratified sampling; large particle size

1 引 言

长期以来, 全面了解并时时监控工程所用砂、石材料的颗粒级配情况是对其开展理论研究及工程实践首先需要解决的问题。通常的做法是取一定量的试样作为样本, 通过对样本开展颗粒分析试验, 以样本的颗粒级配代表材料整体的级配。其中, 所取样本质量的大小是决定试验结果可靠性的关键因素。

为此, 国内外现行规范对颗粒分析试验中最小

取样量做出了明确规定。《建设用砂》(GB/T 14684—2011)^[1]指出, 为确定建筑用砂颗粒级配所需的试样质量最少为 500g。《建设用碎石、卵石》(GB/T 14685—2011)^[2]及《普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准》(JGJ 52—2006)^[3]指出了材料最大粒径在 9.5~80.0 mm 范围内, 为确定碎石、卵石颗粒级配所需最少取样量。但却是同条件下《公路工程集料试验规程》(JTG E42—2005)^[4]规定取样质量的 1.6 倍。对于水力水电行业, 《土工试验规程》(SL 237—1999)^[5]及《水电水利工程土工试验规程》

收稿日期: 2018-04-27

基金项目: 湖南省自然科学基金杰出青年基金项目(No. 2017JJ1033); 中南大学研究生自主探索创新项目(No. 2017zzts150)。

This work was supported by Hunan Provincial Science Fund Outstanding Youth Science Fund Project (2017JJ1033) and Central South University Autonomous Exploration Project (2017zzts150).

第一作者简介: 张升, 男, 1979 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事计算土力学等方面的教学和科研。E-mail: zhang-sheng@csu.edu.cn

通讯作者: 李希, 男, 1989 年生, 博士研究生, 主要从事强夯及颗粒破碎方面的学习和科研。E-mail: csu_lixi@csu.edu.cn

(DL T5355—2006)^[6]仅提供了取样质量的参考范围,且其值仅为文献[1-2]的1/2~1/3。而《水工混凝土砂石骨料试验规程》(DL/T 5151—2014)^[7]规定的取样质量是文献[1-2]的2倍以上。ASTM D422-63^[8]规定了材料最大粒径在76.2 mm以下,筛分试验的最小取样量,但其值仅为文献[1-2]的1/3~1/4。

国际标准 ISO/FDIS 17892-4.2^[9]和欧洲标准 BS EN 932-1^[10]提出了确定试样质量的经验公式,明确了最大粒径是重要的控制指标,但两者也存在较大差异。并且,针对我国常见的包含大量巨粒、级配复杂填土,其适用性尚存疑问。有必要从理论上提出能够确定试样质量的方法。

由此可见:①目前不同行业规范所规定的内容存在明显分歧,对筛分试验所需样本质量仍存在模糊的认识,开展筛分试验合理取样质量的研究具有理论和实践意义;②试验材料的颗粒尺寸,尤其是最大颗粒尺寸是决定取样质量的关键参数,试样质量随着颗粒尺寸的增加而增大。

李希等^[11]基于随机抽样理论,提出一种根据最大粒径确定取样量的理论方法。但对于机场、土石坝、港口等工程,填料尺寸往往达几十厘米甚至一米的量级。对于此类巨粒土,利用李希等^[11]提出的方法得到的试样质量过于保守,颗分试验工程量巨大,并且机场、港口等工程往往面临巨大的填方问题,不同区域、不同标段所用填料颗粒尺寸差异性较大。直接采用随机方法抽样,难以考虑到不同区域填料的差异性,样本对总体的估计往往会产生较大误差。必须根据不同区域所用填料级配特点,有针对性的分区域确定颗粒级配,即先把总体分层,再在每一层独立进行随机抽样。总体参数则根据各层样本参数的汇总做出估计^[12-13]。

鉴于此,文章结合分层抽样理论,对李希等^[11]的工作进行优化和改进,特别是针对含有大量巨粒且粗细差距悬殊、级配极端复杂的填土,提出了一种确定颗粒分析试验中取样质量的通用方法,并通过室内和现场试验验证了该方法的优越性,指导了重庆江北机场和贵阳龙洞堡机场扩建工程粗颗粒料填料的级配确定工作。

2 颗分试验取样质量

2.1 样本容量的确定

在实际颗粒筛分试验中,设整个场地颗粒总数即为样本总量 N (趋向于无穷大),待取的试样量即为所需要的样本量 n 。考察各个粒组对应的颗粒

百分含量。可以将总体中需要考察的对象是否在规定的粒组内而划分为两类,对每个考察对象定义指标值:

$$Y_i = \begin{cases} 1, & \text{总体中第} i \text{个单元在考察的范围内} \\ 0, & \text{总体中第} i \text{个单元不在考察的范围内} \end{cases} \quad (1)$$

若总体中有 A_j 数量的颗粒,其尺寸属于第 j ($j=1, 2, \dots, w$)粒组,则在总体中第 j 粒组颗粒实际数量百分含量 P_j 为

$$P_j = \frac{A_j}{N} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Y_i = \bar{Y} \quad (2)$$

式中: $\bar{Y}$ 为考察对象在总体中实际数量的平均值; N 为样本总量。那么,对于样本量为 n 的试样,若有 n_j 数量的颗粒属于第 j 粒组,则认为总体中所考察的粒组所占的数量比例为

$$p_j = \frac{n_j}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i = \bar{y} \quad (3)$$

式中: $\bar{y}$ 为考察对象在样本中的数量平均值。对于分层抽样,总体均值 $\bar{Y}$ 为各层均值 $\bar{Y}_h$ 对层权 W_h 的加权平均,即

$$\bar{Y} = \sum_{h=1}^L W_h \bar{Y}_h \quad (4)$$

式中: L 为分层数。

由于每层中的抽样都是独立地按照简单随机抽样进行的,样本均值 $\bar{y}$ 可由各层样本按下式求得

$$\bar{y} = \sum_{h=1}^L W_h \bar{y}_h \quad (5)$$

式中: $\bar{y}_h$ 为第 h 层的样本均值。

由于分层抽样,样本所得估计值 $\bar{y}$ 是总体 $\bar{Y}$ 的无偏估计,根据核心定理 $\bar{y}$ 的方差为

$$V(\bar{y}) = \sum_{h=1}^L W_h^2 \frac{1-f_h}{n_h} S_h^2 = \sum_{h=1}^L \left(\frac{1}{n_h} - \frac{1}{N_h} \right) W_h^2 S_h^2 = \sum_{h=1}^L \frac{W_h^2 S_h^2}{n_h} - \sum_{h=1}^L \frac{W_h S_h^2}{N} \quad (6)$$

式中: f_h 为第 h 层样本容量 n_h 与本层颗粒总量 N_h 的比值; N_h 为第 h 层颗粒总数; n_h 为第 h 层样本的颗粒数量,可由 $n_h = nW_h$ 确定; S_h 为第 h 层颗粒尺寸的方差,可由下式求得

$$S_h^2 = \frac{1}{N-1} NP_h(1-P_h) \quad (7)$$

式中: P_h 为第 h 层所考察粒组的百分含量。将 $n_h = nW_h$ 代入式(6)可以得到,为确定第 j 组颗粒含量所需的样本容量 n_j :

$$n_j = \frac{\sum_{h=1}^L W_h S_h^2}{V(\bar{y}) + \frac{1}{N} \sum_{h=1}^L W_h S_h^2} \quad (8)$$

在实际抽样及筛分试验过程中,往往要求由试样所得的估计值 $\bar{y}$ 与总体中的实际值 $\bar{Y}$ 的差别在误差限度内,可用置信度 $1-\alpha$ 和绝对误差限度 d 表示,即

$$P\{|\bar{y} - \bar{Y}| \leq d\} = 1 - \alpha \quad (9)$$

根据双侧分位数 $u_{\alpha/2}$ 定义,有

$$P\left\{\frac{|\bar{y} - \bar{Y}|}{\sqrt{V(\bar{y})}} \leq u_{\alpha/2}\right\} = 1 - \alpha \quad (10)$$

比较式(9)、(10)可得

$$V(p_j) = V(\bar{y}) = \frac{d^2}{(u_{\alpha/2})^2} \quad (11)$$

将式(11)代入式(8)可得 n_j 为

$$n_j = \frac{\sum_{h=1}^L W_h S_h^2}{\frac{d^2}{(u_{\alpha/2})^2} + \frac{1}{N} \sum_{h=1}^L W_h S_h^2} \quad (12)$$

在实际工程现场中,颗粒总数 $N = \infty$,并结合式(7),式(12)可化简为

$$n_j = \frac{(u_{\alpha/2})^2}{d} \sum_{h=1}^L W_h P_{hj} (1 - P_{hj}) \quad (13)$$

式中: P_{hj} 为第 h 层内颗粒尺寸属于 j 组的百分含量。至此,我们得到了为确定第 j 粒组颗粒百分含量所需要的样本容量。为确定所有 w 个粒组颗粒含量,所需要的总取样量为

$$\begin{aligned} n_{\text{all}} = & \frac{(u_{\alpha/2})^2}{d} \sum_{j=1}^w \sum_{h=1}^L W_h P_{hj} (1 - P_{hj}) = \\ & \frac{(u_{\alpha/2})^2}{d} \{W_1 [P_{11} + P_{12} + P_{13} + \dots + P_{1w} - (P_{11}^2 + P_{12}^2 + \dots + P_{1w}^2)] + \\ & W_2 [P_{21} + P_{22} + P_{23} + \dots + P_{2w} - (P_{21}^2 + P_{22}^2 + \dots + P_{2w}^2)] + \dots + \\ & W_h [P_{h1} + P_{h2} + P_{h3} + \dots + P_{hw} - (P_{h1}^2 + P_{h2}^2 + \dots + P_{hw}^2)] \} \end{aligned} \quad (14)$$

这里我们假设各层层权相同,均为分层取样过程中层数的倒数,又因为

$$P_{11} + P_{12} + P_{13} + \dots + P_{1w} = 1 \quad (15)$$

$$P_{h1}^2 + P_{h2}^2 + \dots + P_{hw}^2 \geq \frac{1}{w} \quad (16)$$

代入式(14)得

$$0 \leq n_{\text{all}} \leq \frac{(u_{\alpha/2})^2}{d} \frac{W_h}{w} \left(1 - \frac{1}{w}\right) \quad (17)$$

由于取样量越大,由样本所得估计值的精度会越高,且粒径分组往往根据具体材料尺寸而定,因而 w 取值具有一定任意性。保守的 n_{all} 可取大值,从而有:

$$n_{\text{all}} = \frac{(u_{\alpha/2})^2}{d^2} \frac{W_h}{w} \quad (18)$$

至此,求得为确定整体颗粒级配所取试样应包含的颗粒数量。由式(18)可以看出,筛分试验中样本容量中 n_{all} 由3个因素决定:试验精度要求、层权和试验分组数。且当层数为1时,即不需要进行分层,此时式(18)可退化为随机抽样,结果与李希等^[11]得出的结论相同。

而对于实际工程实践中进行颗分试验,往往采用质量作为取样标准。所确定的试样颗粒数量还需进一步转化为试样质量,将在下文讨论。

2.2 确定样本质量

对于由一定数量的颗粒组成的集合,其整体的质量 m 可由下式求出:

$$m = n_{\text{all}} \rho \frac{1}{6} \pi (\bar{D})^3 \quad (19)$$

式中: ρ 为颗粒密度,可以通过开展颗粒密度试验并结合现场具体情况综合确定。 $\bar{D}$ 为颗粒整体的平均粒径。对于本文,平均粒径为颗粒整体的质量等效粒径,可以用下式表示:

$$\bar{D} = \left\{ \frac{\sum_{j=1}^w \left[\frac{n_j \pi \rho (D^j)^3}{6} \right]}{\frac{\pi \rho \sum_{j=1}^w n_j}{6}} \right\}^{\frac{1}{3}} \quad (20)$$

式中: D^j 为第 j 粒组的颗粒尺寸; π 为圆周率。由此可见,材料平均粒径由其颗粒级配分布特征唯一决定。而对于本位,在开展颗粒筛分试验之前,颗粒级配分布特征不可知, $\bar{D}$ 取值无法直接由式(20)确定。此时可采用 $0.5(D_M + D_m)$ 来替代 $\bar{D}$ 进行试算,其中, D_M 为填料中最大的粒径尺寸, D_m 为填料中最小的粒径尺寸,并依据 $0.5(D_M + D_m)$ 与 $\bar{D}$ 的大小关系,将材料的颗粒级配分布整体分为3类(如图1所示):第I类 $\bar{D} \leq 0.5(D_m + D_M)$;第II类 $\bar{D} = 0.5(D_m + D_M)$;第III类 $\bar{D} \geq 0.5(D_m + D_M)$ 。

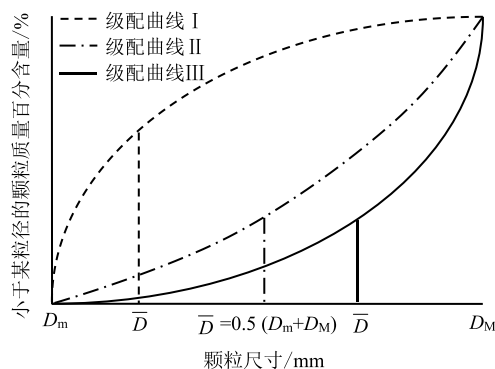


图1 3类级配曲线

Fig.1 Three kinds of PSD curves

首先讨论第II种情况, 结合式(19)可得所需试样质量为

$$m = n_{\text{all}} \rho \frac{1}{6} \pi \left(\frac{D_m + D_M}{2} \right)^3 \quad (21)$$

相对于最大粒径 D_M 而言, D_m 的影响可以忽略。从而, 有

$$m = n_{\text{all}} \rho \pi D_M^3 / 48 \quad (22)$$

对于第I类情况, 粗颗粒含量偏少, 细颗粒含量偏多。材料整体平均粒径较小。又由于相同情况下样本容量越大, 所得试验结果越能反映总体情况, 由样本所得试验结果越可信; 且随着取用的平均粒径的增大所需的样本质量增大, 因此仍可偏于保守的按照式(22)确定样本质量。

对于第III类情况, 粗颗粒含量多, 细颗粒含量较少。材料整体平均粒径大。此时可采用循环迭代法确定取样质量及颗粒级配: 首先进行第1次取样, 通过颗粒分析试验确定第1次取样的颗粒级配 PSD_1 。此时由试样所得 PSD_1 并不满足精度要求, 可由 PSD_1 按照式(20)确定平均粒径 $\bar{D}_1$, 代入式(22)得出确定第2次取样的样本质量, 通过颗粒分析试验可得样本颗粒级配 PSD_2 和 $\bar{D}_2$; 取平均粒径为 $\bar{D}_2$ 进行下一轮抽样, 直至 $\bar{D}_{k+1} \leq \bar{D}_k \leq \pm 0.5 \text{ mm}$ (k 表示第 k 次取样), 即计算所需下次取样质量小于本次时循环终止, PSD_k 为所求材料级配。面对未知土样颗粒级配, 可用如下方法进行判断分类, 具体操作流程如图2所示, 其中上标“st”和“th”为次序标注。

3 试验验证

本节将通过开展一系列筛分试验, 对本文的方法进行验证。选来自陕西省榆林市煤矸石作为试验原料, 强度为 10 MPa 左右, 在筛分过程中不会出现破碎等情况, 最大粒径 D_M 为 160 mm, 符合本

文验证的情况, 故采用煤矸石作为试验原料。取总质量为 70 802 g 煤矸石作为样本总体, 精度要求取置信度 95%, 绝对误差 10%, 试验基本参数如表1所示。

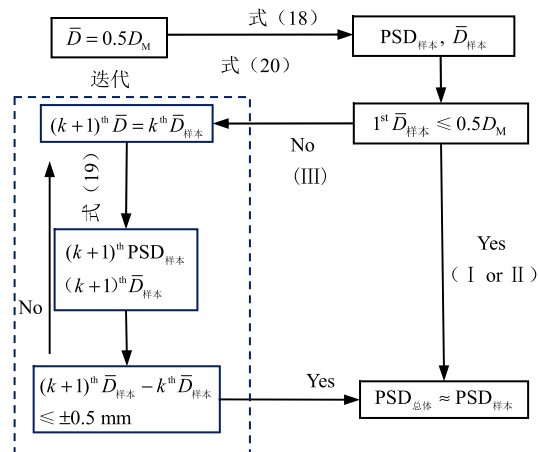


图2 确定试样质量操作流程

Fig.2 Flow chart of sample mass determination

表1 煤矸石筛分试验基本参数

Table 1 Basic parameters of coal gangue in the sieving test

样本总量 /g	D_M /mm	密度 /(g/cm ³)	层权	置信度 /%	$d/\%$	样本量 /g
70 802	160	2.2	0.25	95	7.07	18 860

注: 层权为分层数的倒数。

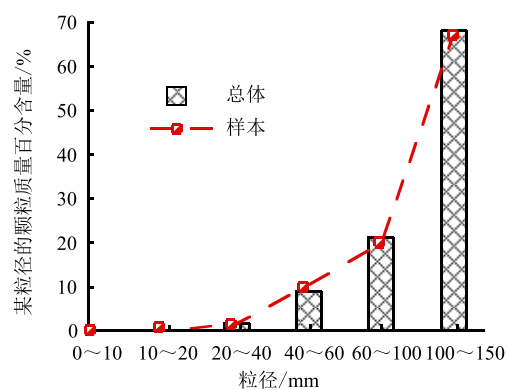
3.1 第II类级配状态下的验证

通过控制各粒组颗粒的百分含量, 配置材料平均粒径恰为 $0.5D_M$ 的煤矸石 70 802 g 作为材料总体, 各粒组颗粒含量如图3所示, 即为图1中第II类级配。据式(22)可求得, 要达到置信度 95% 所需的样本质量为 18 860 g。在分层抽样理论中, 分层数过多会对总体结果产生较大误差, 具体分层数量一般依据所研究对象特点和研究目的而定。文章以分4层为例来验证所提出方法的适用性。在各层内分别取样汇总后进行筛分试验并与总体的颗粒级配相比较, 筛分试验结果如图3所示。

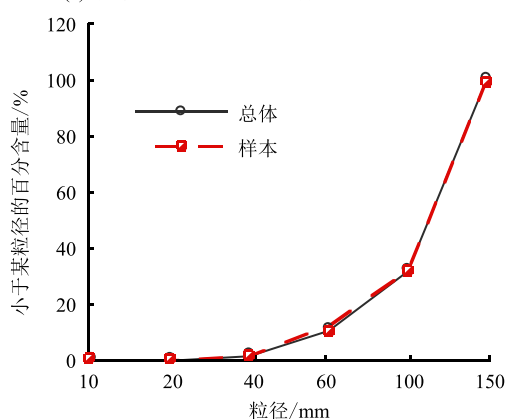
可以看出, 按照分层抽样所得样本的各个粒组颗粒含量与材料总体各粒组颗粒含量接近: 各粒组颗粒含量最大仅相差 1.55%, 累计相差 3.67%。而按照李希等^[11]提出的方法所需试样质量为 452 640 g, 已远超试验材料总量, 筛分试验工作量巨大。

3.2 第I类级配状态下的验证

通过控制各粒组颗粒的百分含量, 配置材料平均粒径为 70.51 mm 的煤矸石材料 70 802 g 作为材料总体, 以 18 860 g 试样作为样本试样, 各粒组颗粒含量如图4所示, 即为图1中第I类级配。



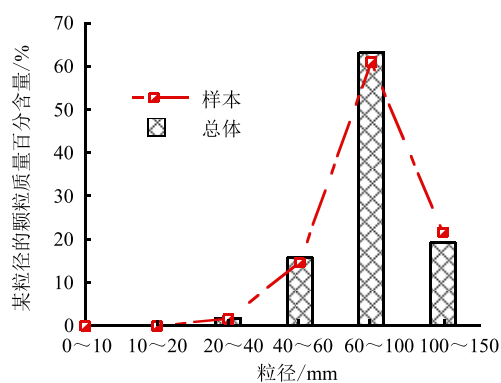
(a) 样本和总体各粒组百分含量对比 (级配 II)



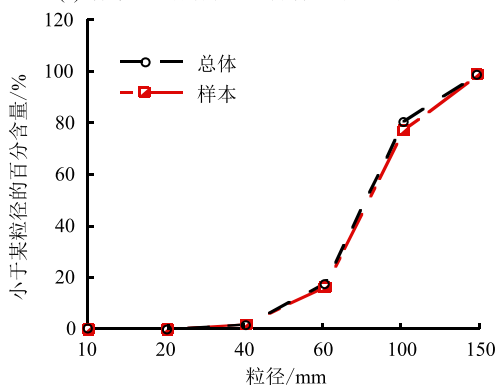
(b) 样本和总体颗粒级配曲线对比 (级配 II)

图3 18 860 g 煤矸石试样颗粒级配与第 II 类级配总体对比

Fig.3 PSD of 18 860 g coal gangue sample versus the overall PSD II



(a) 样本和总体各粒组百分含量对比 (级配 I)



(b) 样本和总体颗粒级配曲线对比 (级配 I)

图4 18 860 g 煤矸石试样颗粒级配与第 I 类级配总体对比

Fig.4 PSD of 18 860 g coal gangue sample versus the overall PSD I

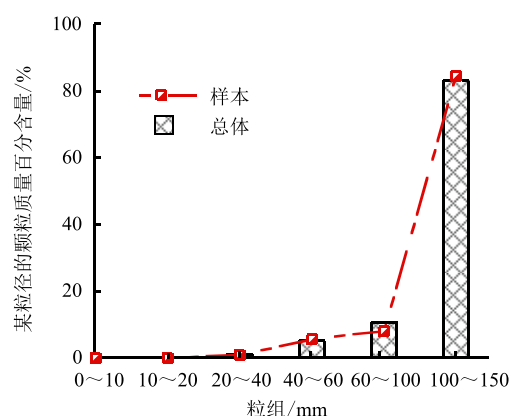
取 $\bar{D} = 0.5D_M = 80 \text{ mm}$ ，得到此种级配情况下所需样本量为 18 860 g，按照分层抽样的方法从材料总体中取样，将样本均分为 4 层，分别取样汇总后进行筛分试验并与总体的颗粒级配相比较，筛分试验结果如图 4 所示。

由图可知，由于对样本与总体各粒组百分含量累计误差为 5.96%，虽然平均粒径取 $0.5D_M$ 所确定的样本质量趋于保守，但仍能够取得准确的试验结果。

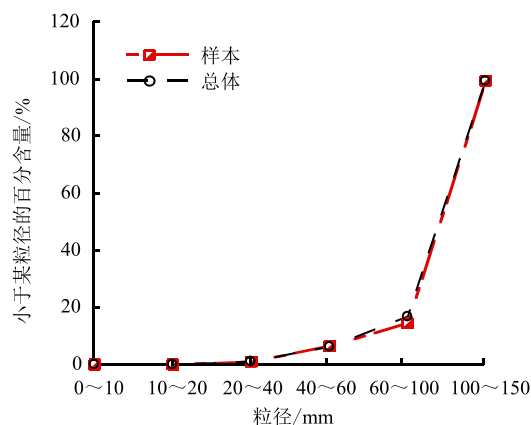
3.3 第 III 类级配状态下的验证

通过控制各粒组颗粒的百分含量，配置材料平均粒径为 89.69 mm 的煤矸石 70 802 g 作为材料总体，各粒组颗粒含量如图 5 所示，即为图 1 中第 III 类级配。取 $\bar{D} = 80 \text{ mm}$ ，据式 (22) 试样质量为 18 860 g。样本级配与总体累计误差达 6.2%。按照图 2 所示步骤得到不同质量的试样与总体对比情况如图 6 及表 2 所示。

可以看出，随着迭代次数的增加，每次迭代试样质量从 18 860 g 增加到 27 947 g，由样本所得各粒组颗粒含量与总体的累计误差依次减小。并且，



(a) 样本和总体各粒组百分含量对比 (级配 III)



(b) 样本和总体颗粒级配曲线对比 (级配 III)

图5 18 860 g 煤矸石试样颗粒级配与第 III 类级配总体对比

Fig.5 PSD of 18 860 g coal gangue sample versus the overall PSD III

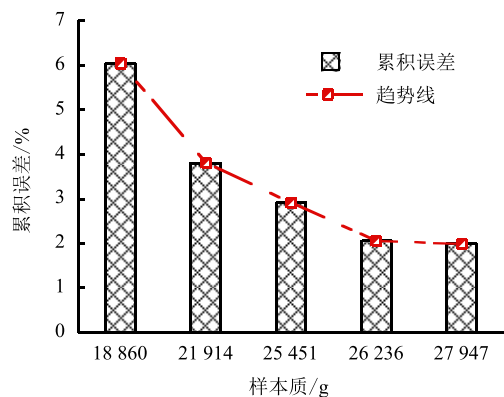


图6 累计误差及平均粒径随取样质量变化

Fig.6 Variation of the cumulative error and average particle size with different sample mass

表2 不同迭代次数试样基本参数

Table 2 Basic parameters of different iterations

迭代次数	质量/g	$\bar{D}$ /mm	累积误差/%
1	18 860	85.9	6.04
2	23 352	88.4	3.81
3	25 451	89.3	2.92
4	26 236	91.6	2.06
5	27 947	91.2	1.99

在第4次迭代,即取样质量为26 236 g所得累计误差降为2.0%,且 $(\bar{D}_4 - \bar{D}_5) \leq \pm 0.5$ mm,可以认为第4次筛分试验所得颗粒级配可以代表材料整体的级配。

综上所述,对于颗粒级配处于第Ⅱ类级配曲线以上区域的情况,可直接利用式(22)确定颗粒分析试验所需试样质量;对于颗粒级配处于第Ⅱ类级配曲线以下区域的情况,采用循环迭代仍可以得到可靠的结果。

4 工程应用

以文中提出的方法为指导,开展了重庆江北机场和贵州龙洞堡机场扩建工程所用填料的级配确定工作。

重庆江北机场拟建场地位于渝北区辖区,场地主要为斜坡状丘陵,地形较陡;机场最大的填筑高度为114 m。实际现场试验取置信水平为95%,绝对误差为7.07%。其中,针对第3标段和第6标段包含巨粒土的情况,同时采用李希等^[11]的随机抽样方法与本文依据分层抽样理论提出的方法确定筛分试验中试样质量,结果如图7所示。工程现场8个标段取样质量参数及颗粒级配情况分别如表3和图8所示。

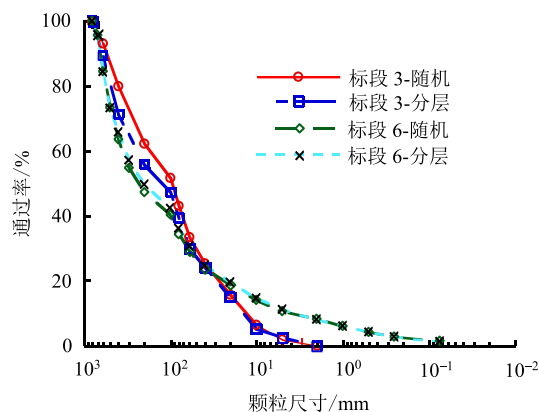


图7 两种抽样方法所得颗粒级配曲线对比

Fig.7 Comparison of grading curves from two sampling methods

表3 江北机场8个标段筛分试样基本参数

Table 3 Basic parameters of eight sieving samples in Jiangbei Airport

标段	$\bar{D}_{\text{样本}}$	$0.5D_M$	随机抽样质量 /kg	分层抽样质量 /kg
1	34.8	50.0	118.064	/
2	36.8	50.0	118.064	/
3	206.6	400.0	56 591.400	1 414.785
4	40.8	50.0	118.064	/
5	40.9	75.0	398.466	/
6	283.3	350.0	46 629.800	1 165.745
7	42.3	75.0	398.466	/
8	14.6	25.0	14.758	/

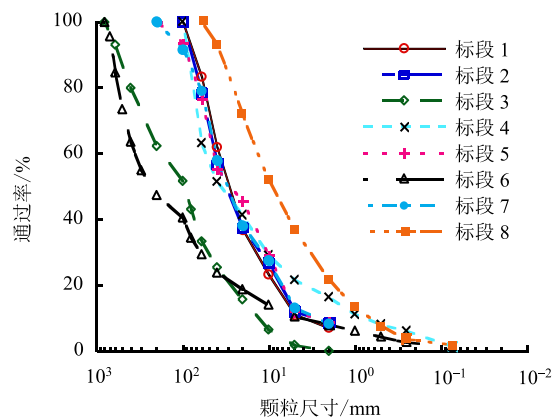


图8 重庆某机场所用粗粒料颗粒级配曲线

Fig.8 Coarse aggregate grading curves in an airport in Chongqing

从表3可知,针对第3标段和第6标段包含巨粒土的情况,按照本文提出的方法所确定的试样质量远小于随机抽样所确定的试样质量。由图7可看出,两种抽样方法所得颗粒级配曲线接近,按照分层抽样理论所确定试样的颗粒级配可以代表材料整体的级配分布情况,大大节约了试验成本,分层抽样较随机抽样表现出明显的优越性。

龙洞堡机场所处为可溶岩分布区，地形起伏，残丘低矮，溶丘和溶蚀洼地较发育，相对高差小于 100 m。勘察区西侧为一岩溶洼地，洼地标高为 1 085 m 左右，整个斜坡高度约 45 m，为一期工程和此次堆填形成的边坡，对所用填料级配质量有严格要求。

整片场地分 9 个标段，首先经踏勘选定不同标段场地内颗粒最大粒径，取样过程中平均粒径取 $0.5D_M$ 、置信度 95% 及绝对误差 7.07% 和层权为 0.25 按照式 (22) 确定取样质量（同时也列出随机抽样所需样本的质量），如表 4 所示。通过对试样进行颗粒分析试验，得到整片场地颗粒级配区间如图 9 所示。可以看出，所用粗粒料不均匀系数在 5.3~32.1 之间，曲率系数在 1.02~2.78 之间，整体颗粒级配良好。

表 4 不同标段所需样本质量
Table 4 Weights of samples in different sections

标段	$\bar{D}_{\text{样本}}$	$0.5D_M$	分层抽样质量 /kg	随机抽样质量 /kg
1	198.3	500	4 605.4	110 529.6
2	132.0	400	2 357.9	56 589.6
3	227.4	500	4 605.4	110 529.6
4	127.1	400	2 357.9	56 589.6
5	127.9	400	2 357.9	56 589.6
6	119.4	400	2 357.9	56 589.6
7	133.5	400	2 357.9	56 589.6
8	107.0	300	994.8	23 875.2
9	64.7	300	994.8	23 875.2

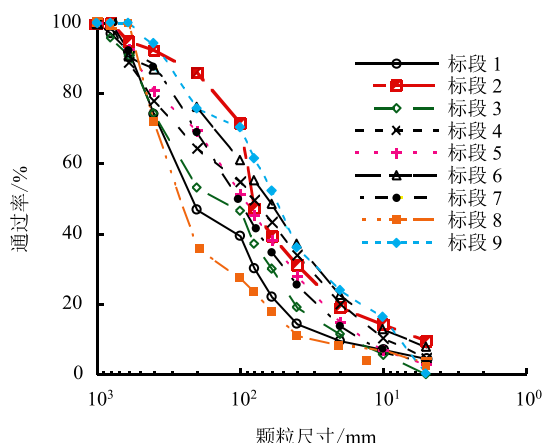


图 9 龙洞堡机场填料颗粒级配
Fig.9 PSD curves of fillers in Longdong fort airport

由图 9 和表 4 可以看出，填料级配属于本文中的第 I 类级配。针对填料粒径巨大和不同区域颗粒尺寸差异性明显的情况，在满足精度要求的前提下，

采用分层抽样所确定的取样量远小于随机抽样，极大减少了颗分试验工作量，节约了成本。

5 结 论

(1) 为确定包含巨大颗粒、不同区域颗粒尺寸差异明显的填料级配，必须有针对性的将整体划分为若干区域，分别进行抽样分析。颗分试验试样的生成实际上是一种分层过程。当层数为 1 时，即退化为随机抽样。

(2) 颗分试验中所需的试样最少颗粒数量可以由精度要求、层权和颗粒尺寸分组数量唯一确定。颗粒集合的平均粒径由所有颗粒的大小共同决定；通过分析材料颗粒级配与平均粒径的关系，建立了能够将样本容量转化为样本质量的通用方法。

(3) 开展的针对性试验表明，所提出的方法在满足精度要求的前提下，所确定的试样质量较随机抽样明显减少，在粒径巨大和不同区域颗粒尺寸差异性明显的问题上，有明显优越性，能够得到可靠的结果。

(4) 文章在前一阶段工作的基础上，对提出的为确定材料级配所需的试样质量的方法进行补充和改进，以期对相关工程实践及规范的完善提供参考。文中所提方法的优点主要在于当颗粒较大时减少抽样量，以达到筛分标准。对于工程现场不同区域颗粒级配特征差异性较大或者单个区域工作量较大的情况，也可以对该区域单独进行分层抽样，以获取可靠结果。

参 考 文 献

- [1] 中国建筑材料联合会. GB/T 14684—2011 建设用砂[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
China Building Material Federation. GB/T 14684—2011 Sand for construction[S]. Beijing: China Standard Press, 2011.
- [2] 中国砂石协会. GB/T 14684—2011 建筑用碎石、卵石[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
China Aggregates Association. GBT 14684—2011 Pebble and crushed stone for construction[S]. Beijing: China Standard Press, 2011.
- [3] 中华人民共和国建设部. JGJ 52—2006 普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.
Ministry of Construction of the People's Republic of China. JGJ 52—2006 Standard for technical requirements and test method of sand and crushed stone (or gravel) for

- ordinary concrete[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2006.
- [4] 中华人民共和国建设部. JTG E42—2005 公路工程集料试验规程[S]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
- Ministry of Construction of the People's Republic of China. JTG E42—2005 Test methods of aggregate for highway engineering[S]. Beijing: China Communications Press, 2005.
- [5] 中华人民共和国水利部. SL237—1999 土工试验规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.
- Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. SL237—1999 Specification of soil test[S]. Beijing: China Water & Power Press, 1999.
- [6] 中华人民共和国水利部. DL/T5355—2006 水电水利工程土工试验规程[S]. 北京: 中国电力出版社, 2006.
- Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. DL/T5355—2006 Code for soil tests for hydropower and water conservancy engineering[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2006.
- [7] 中华人民共和国水利部. DL/T 5151—2014 水工混凝土砂石骨料试验规程[S]. 北京: 中国电力出版社, 2014.
- Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. DL/T 5151—2014 Code for testing aggregates of hydraulic concrete[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2014.
- [8] American Society for Materials and Testing. ASTM D422-63 Standard test method for particle-size analysis of soils[S]. Philadelphia: [s. n.], 2007, 8(3): 309—337.
- [9] International Standards Organization. ISO/FDIS 17892-4.2 Geotechnical investigation and testing—laboratory testing of soil—part 4: determination of particle size distribution[S]. [S. l.]: [s. n.], 2016.
- [10] European Standards Organization. BS NE 932-1 Tests for general properties of aggregates—part 1: methods for sampling. [S. l.]: [s. n.], 1997.
- [11] 李希, 张升, 盛代超, 等. 基于抽样可靠性的颗分试验取样数量研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(11): 2122—2127.
- LI Xi, ZHANG Sheng, SHENG Dai-chao, et al. A reasonable sample capacity for grain size analysis test based on sampling reliability[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2016, 38(11): 2122—2127.
- [12] 张科芬, 张升, 滕继东, 等. 颗粒破碎的三维离散元模拟研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(7): 2119—2127.
- ZHANG Ke-fen, ZHANG Sheng, TENG Ji-dong, et al. 3D numerical simulation of particle breakage using discrete element method[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38(7): 2119—2127.
- [13] 郭万里, 朱俊高, 余挺, 等. 土的连续级配方程在粗粒料中的应用[J]. 岩土力学, 2018, 39(10): 3661—3667.
- GUO Wan-li, ZHU Jun-gao, YU Ting, et al. Application of gradation equation for coarse-grained soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2018, 39(10): 3661—3667.
-
- 上接第 2554 页
- [35] BAUER E. Calibration of a comprehensive hypoplastic model for granular materials[J]. **Soils and Foundations**, 1996, 36(1): 13—26.
- [36] 陈生水, 傅中志, 韩华强, 等. 一个考虑颗粒破碎的堆石料弹塑性本构模型[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(10): 1489—1495.
- CHEN Sheng-shui, FU Zhong-zhi, HAN Hua-qiang, et al. An elastoplastic model for rockfill materials considering particle breakage[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2011, 33(10): 1489—1495.
- [37] EINAV I. Breakage mechanics-part I: theory[J]. **Journal of the Mechanics and Physics of Solids**, 2007, 55(6): 1274—1297.
- [38] 杨光, 张丙印, 于玉贞, 等. 不同应力路径下粗粒料的颗粒破碎试验研究[J]. 水利学报, 2010, 41(3): 338—342.
- YANG Guang, ZHANG Bing-yin, YU Yu-zhen. An experimental study on particle breakage of coarse-grained materials under various stress paths[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2010, 41(3): 338—342.
- [39] HARDIN B O. Crushing of soil particles[J]. **Journal of Geotechnical Engineering**, 1985, 111(10): 1177—1192.
- [40] BEEN K, JEFFERIES M G. State parameter for sands[J]. **Geotechnique**, 1985, 35(2): 99—112.