

激光粒度仪与密度计法在黏土颗粒分析试验的研究与应用

李小勇¹, 宋振海², 郑学秋², 矫芳芳¹

¹山东高速工程检测有限公司, 山东 济南

²山东省交通运输厅工程建设事务中心, 山东 济南

收稿日期: 2021年12月17日; 录用日期: 2021年12月31日; 发布日期: 2022年1月18日

摘要

通过对激光粒度仪法和密度计法两种试验方法的对比, 分析了两种试验方法的优劣。激光粒度仪具有测试速度快、操作方便、重复性好、测试范围宽等优点, 在道路材料检测领域的应用日益增多。选取试验路中两种具有代表性的黏性土样进行试验, 取小于0.075 mm的土样进行激光粒度仪法和密度计法两种试验。对试验数据进行对比分析发现, 激光粒度仪法所得粒径尺寸略大于密度计法; 粒径较小的黏土颗粒更容易黏聚在一起; 两种试验具有较高的相关性, 通过回归分析建立了两种试验的回归方程。

关键词

激光粒度仪法, 密度计法, 颗粒分析, 回归方程

Research and Application of Laser Particle Sizer and Densitometer Method in Clay Particle Analysis Test

Xiaoyong Li¹, Zhenhai Song², Xueqiu Zheng², Fangfang Jiao¹

¹Shandong High-Speed Engineering Inspection Co. Ltd., Jinan Shandong

²Shandong Provincial Department of Communications and Transportation Engineering Construction Service Center, Jinan Shandong

Received: Dec. 17th, 2021; accepted: Dec. 31st, 2021; published: Jan. 18th, 2022

Abstract

By comparing the two test methods of laser particle sizer method and densitometer method, the

文章引用: 李小勇, 宋振海, 郑学秋, 矫芳芳. 激光粒度仪与密度计法在黏土颗粒分析试验的研究与应用[J]. 土木工程, 2022, 11(1): 35-41. DOI: 10.12677/hjce.2022.111005

advantages and disadvantages of the two test methods are analyzed. Laser particle sizer has the advantages of fast testing speed, convenient operation, good repeatability and wide testing range. It is increasingly used in the field of road material testing. Two representative cohesive soil samples in the test road are selected for the test, and the soil samples less than 0.075 mm are taken for the laser particle sizer method and densitometer method. By comparing and analyzing the experimental data, it is found that the particle size obtained by laser particle sizer method is slightly larger than that by densitometer method; Clay particles with smaller particle size are easier to stick together; The two tests have high correlation. The regression equations of the two tests are established by regression analysis.

Keywords

Laser Particle Sizer Method, Densitometer Method, Particle Analysis, Regression Equation

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

颗粒分析试验是用于测定不同粒组所占总质量百分比含量的一项重要试验[1]。传统的颗粒分析试验主要包括以下三种试验：筛分法、密度计法和移液管法[2]。筛析法所适用的土的粒径范围是(0.075~60) mm，密度计法和移液管法适用的是粒径范围小于 0.075 mm 的土[3]。对于粒径小于 0.075 mm 的土，由于密度计法仪器设备相对简单而被广泛采用，但该方法也存在着工作量大、重复性差等缺点[4] [5] [6]。随着多领域的进步发展，激光粒度仪在工程检测领域的使用也日益增多。激光粒度分析仪具有测试速度快、操作方便、重复性好、测试范围宽等优点[7]，在道路检测等多个领域获得了成功应用。

虽然激光粒度仪有诸多优势，作为非标准方法，仍需将其数据进行转化方可使用。取具有代表性的两种土样进行液塑限试验和颗粒分析试验，判断土样的性质。筛分后取小于 0.075 mm 范围的土样进行试验，分别采用密度计法和激光粒度仪法对试验路土样进行颗粒分析试验，分析两者之间的相关性，并建立两者之间的转换关系，以提高激光粒度仪在土工检测领域的精度和应用。

2. 激光粒度仪法和密度计法对比

2.1. 试验原理

1) 密度计法原理

密度计法以斯托克斯(Stocks)定律为基础，土颗粒在悬液中自由下沉时受到自身重力和悬液阻力的双重影响，不同粒径的土颗粒下沉速度不同。采用密度计测量不同时间悬液的密度，可以以此计算出不同粒径颗粒的含量，计算公式如式(1)所示。

$$d = \sqrt{\frac{1800 \times 10^4 \eta}{(G_s - G_{ot}) \rho_{\omega 4} g} \times \frac{L}{t}} \quad (1)$$

式中： d ——土粒直径；

η ——水的动力黏滞系数；

$\rho_{\omega 4}$ ——4℃时水的密度；

- G_s ——土粒比重；
 G_{wt} —— t °C时水的比重；
 L ——某一时间 t 内土粒沉降距离；
 g ——重力加速度；
 t ——沉降时间。

采用密度计法进行颗粒分析需要满足以下三个假设：a) 土颗粒均匀且互不干扰的分布在悬液中；b) 土颗粒是均匀下沉的；c) 土颗粒为圆球形状。

2) 激光粒度仪法原理

激光粒度仪利用的是光的散射原理，光在传播过程中遇到土颗粒会发生散射，光散射后的方向与原传播方向形成一个夹角 θ 。 θ 与土颗粒的粒径大小呈现负的相关性，粒径越大，散射角 θ 越小，反之则越大。因此，通过夹角 θ 就可以对土颗粒粒径的大小进行判断，计算公式如式(2)和式(3)所示。

$$I(\theta) = \frac{1}{\theta} \int_0^{\infty} R^2 \cdot n(R) J_1^2(\theta RK) dR \quad (2)$$

$$K = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (3)$$

式中： $I(\theta)$ ——散射角为 θ 时光的强度；

- θ ——光的散射角度；
 R ——颗粒半径；
 $n(R)$ ——颗粒粒径分布函数；
 J_1 ——第一型贝叶斯函数；
 λ ——激光波长。

采用激光粒度仪法进行颗粒分析同样需要满足以下三个假设：a) 颗粒是不透明的，光速不可穿过颗粒；b) 当需要分散介质进行分散时，介质与颗粒之间的折射率是相同的；c) 颗粒为圆球形状。

2.2. 试验方法和仪器设备

密度计法与激光粒度仪法试验原理不同，所采用的试验方法和设备也不相同。在进行小于 0.075 mm 的颗粒分析试验中，密度计法由于仪器设备相对简单而被广泛采用。在分析密度计法与激光粒度仪法试验原理之后，还需从试验方法和仪器设备方面对两种试验方法进行对比分析，如表 1 所示。

Table 1. Experimental comparison between densitometer method and laser particle size analyzer method

表 1. 密度计法与激光粒度仪法试验对比

对比分析	密度计法	激光粒度仪法
相同之处	取小于 0.075 mm 颗粒风干后的土样进行分散处理，选择相应仪器设备进行颗粒分析试验。	
仪器设备	密度计、1000 ml 量筒、温度计、搅拌器、煮沸设备、秒表等	S3500 型激光粒度仪
测试范围	<100 μm	(0.02~2800) μm
不同之处	所需样品数量	30 g
	仪器校正	密度计刻度及弯月面校正、温度校正、土粒比重校正和分散剂校正
	平均测量时间	(2~3) d
		(1~2) min

综上所述,与密度计法相比,采用激光粒度仪法进行颗粒分析试验,不仅具有可测试范围大、所需样品少等优点,还具有操作简单和节省试验时间等优势,可以极大的提高试验效率,具有较高的推广意义。

3. 试验方案

试验路位于潍坊市,试验土样取自于潍坊市典型细粒土。首先,选取 2 种典型细粒土进行液塑限试验判断土的性质。其次进行筛分试验,对于无黏聚性土,直接过筛进行筛分试验;对于含有黏土粒的砂砾土,则需要用清水浸泡搅拌,使土颗粒充分分散。取筛分后小于 0.075 mm 的土样采用密度计法和激光粒度仪法进行试验,判断两者的相关性并建立回归方程。

采用密度计法进行颗粒分析试验时,选用甲种密度计按照规范进行量测。采用激光粒度仪法进行颗粒分析试验时,设备选用 S3500 型激光粒度仪。设备可检测(0.02~2800) μm 范围内的颗粒,样品数量只需(0.05~2) g,精度误差可控制在 0.6% 范围以内。试验前同样采用分散剂将土样分散,避免试验时由于土颗粒抱团未彻底分散开而影响试验精度。激光粒度仪法以蒸馏水为介质,仅需极少量的土样即可进行试验,土样倒入蒸馏水中进行实验,程序可自动计算土样颗粒粒径。

4. 结果分析

4.1. 筛分和液塑限结果分析

对土样进行含水率试验、液塑限试验和筛分试验,判定土的性质,试验数据如表 2 和表 3 所示。

Table 2. Soil moisture content and liquid-plastic limit test

表 2. 土样含水率及液塑限试验

土样	含水率	液限	塑限	塑性指数
土样 1	3.6	31.3	19.3	12.0
土样 2	3.4	32.1	19.7	12.4

Table 3. Soil sample particle analysis test

表 3. 土样颗粒分析试验

小于该孔径质量百分数(%)	土样	孔径(mm)							
		20	10	5	2.0	1.0	0.5	0.25	0.075
	土样 1	100	97.7	91.2	80	73.9	64.3	53.2	37.7
	土样 2	100	97.8	90.0	78.7	72.5	62.6	52.2	37.6

从表 2 可以看出,两种土样均为低液限黏土;从表 3 可以看出,粒径小于 0.075mm 的颗粒含量超过土总质量的 30%,需要对粒径小于 0.075mm 的部分另做密度计法试验进行分析。

4.2. 密度计法与激光粒度仪试验对比分析

4.2.1. 颗粒分布曲线

对两种土样分别采用激光粒度仪法和密度计法进行试验,得出试验数据,并进行整理分析,绘制如图 1 所示的颗粒分布曲线。

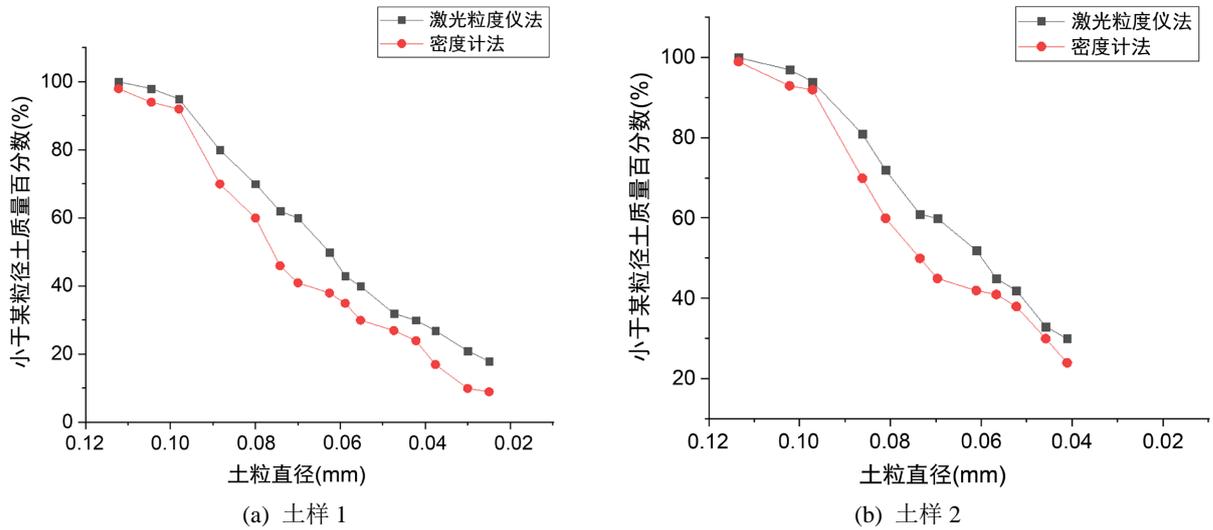


Figure 1. Grading curve of laser particle size analyzer and densitometer method
图 1. 激光粒度仪法与密度计法级配曲线

由图 1 可知，两种土样采用激光粒度仪法和密度计法得出的粒径变化曲线趋势变化基本一致，激光粒度仪法得出的相同粒径下小于某粒径土质量百分数略大于密度计法所测的百分数，粒径处于 (0.06~0.08) mm 范围时相差较大，粒径小于 0.06 mm 和大于 0.08 mm 时相差较小；这是因为采用激光粒度仪法检测时，土颗粒未完全分散开，土颗粒之间仍有部分颗粒抱团在一起，导致试验数据偏大，颗粒分布曲线中含有超过 0.075 mm 的颗粒，同样是由于颗粒抱团在一起，使得颗粒尺寸变大导致。

4.2.2. 不同粒径颗粒含量比较

将试验数据进行整理，将激光粒度仪法与密度计法所测得的两种土样不同粒径百分比含量相减得到两种方法的百分比误差，绘制成如图 2 所示的百分比误差图。

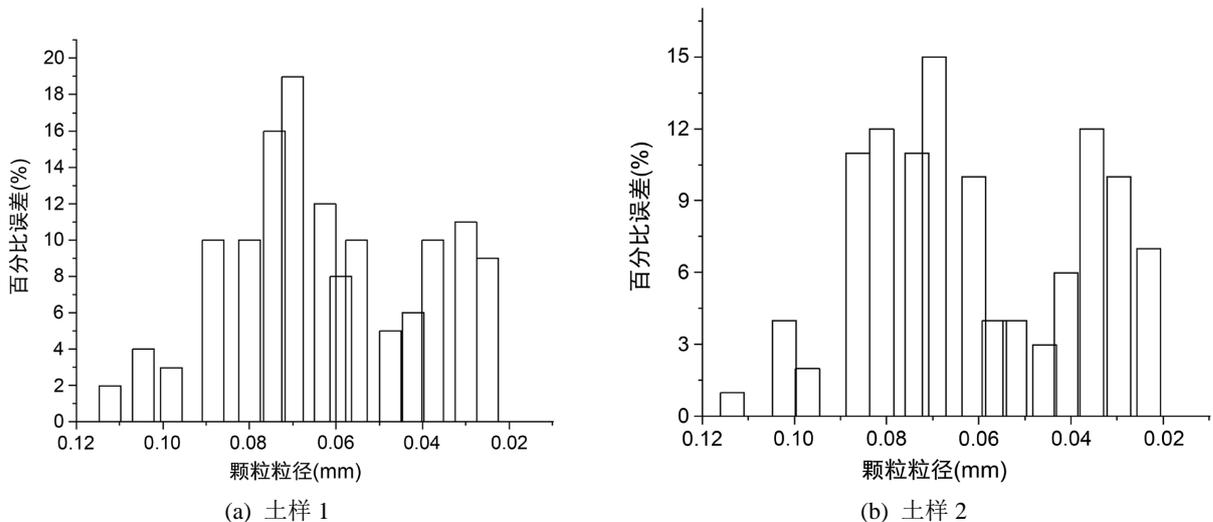


Figure 2. Percentage error between laser particle size analyzer method and densitometer method
图 2. 激光粒度仪法与密度计法百分比误差

从图 2(a)可以看出，当粒径处于 0.02~0.04 mm 和 0.05~0.09 mm 时土样 1 的百分比误差较大，其中粒

径为 0.07 mm 时最大；当粒径处于 0.04~0.05 mm 和 0.09~0.11 mm 时土样 1 的百分比误差较小，其中粒径为 0.11 mm 时最小。从图 2(b)可以看出，当粒径处于 0.02~0.04 mm 和 0.06~0.09 mm 时土样 2 的百分比误差较大，其中粒径为 0.07 mm 时最大；当粒径处于 0.04~0.06 mm 和 0.09~0.11 mm 时土样 2 的百分比误差较小，其中粒径为 0.11 mm 时最小；前文分析得出结论，是由于土颗粒未分散彻底导致土颗粒产生抱团现象，图 2 中 0.02~0.04 mm 和 0.06~0.09 mm 时土样的百分比误差大，表明粒径小于 0.06 mm 的土颗粒更容易黏聚在一起产生较大颗粒，而 0.09~0.11 mm 时土样的百分比误差较小，表明粒径较大的颗粒黏聚在一起的比例较低，这与大粒径土颗粒含量较少、大粒径土颗粒含量黏聚性小于小粒径颗粒有关。

4.2.3. 两种方法结果相关性分析

将密度计法与激光粒度仪法所测得的不同粒径对应的百分比含量进行对比分析，绘制成如图 3 所示的试验结果对比图。

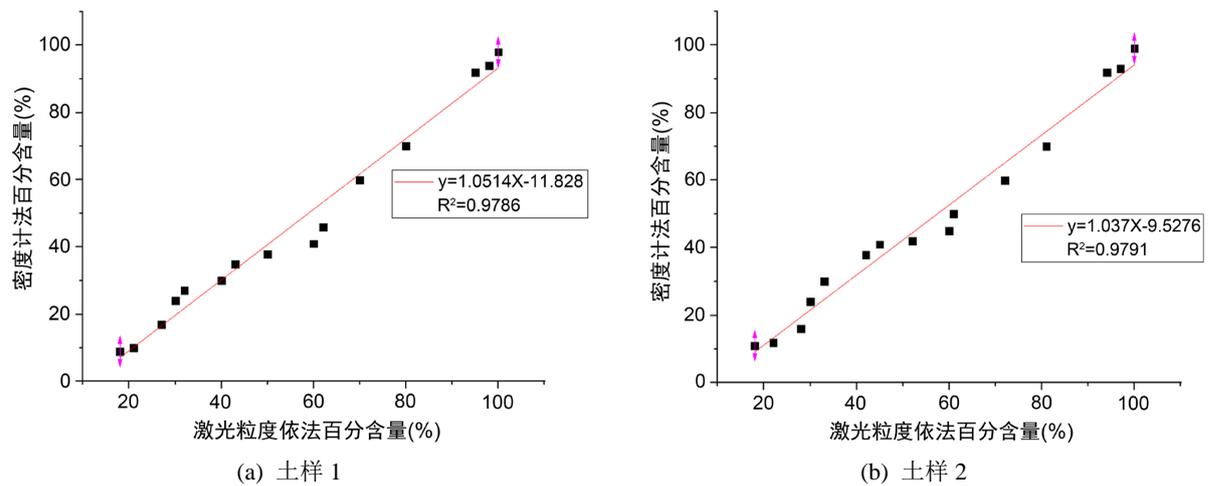


Figure 3. Comparison of experimental results between laser particle size analyzer method and densitometer method
图 3. 激光密度仪法与密度计法试验结果对比

由图 3 可知，两种土样的 R^2 均超过了 0.97，表明激光粒度仪法和密度计法得出的百分含量具有较高的相关性，两种试验方法可以进行转化。对试验数据进行线性回归分析，得出线性回归方程及相关系数，如表 4 所示。

Table 4. Regression equation and correlation coefficient

表 4. 回归方程及相关系数

样本类型	回归方程	相关系数 R^2
土样 1	$Y = 1.0514X - 11.828$	0.9786
土样 2	$Y = 1.307X - 9.5276$	0.9791

5. 结论

本文采用密度计法和激光粒度仪法两种方法对试验路两种低液限黏土进行颗粒分析试验，通过对比分析发现：

1) 低液限黏土通过激光粒度仪法获得的数据略大于密度计法，粒径处于(0.06~0.08) mm 范围时相差较大，粒径小于 0.06 mm 和大于 0.08 mm 时相差较小，这是因为采用激光粒度仪法检测时，土颗粒未完

全分散开, 导致试验数据偏大。

2) 当粒径处于 0.02~0.04 mm 和 0.05~0.09 mm 时土样的百分比误差较大, 其中粒径为 0.07 mm 时最大; 当粒径处于 0.04~0.05 mm 和 0.09~0.11 mm 时土样的百分比误差较小, 其中粒径为 0.11 mm 时最小。表明粒径小于 0.06 mm 的土颗粒更容易黏聚在一起而产生较大颗粒, 粒径较大的颗粒黏聚在一起的比例较低, 这与大粒径土颗粒含量较少和大粒径土颗粒含量黏聚性小于小粒径颗粒有关。

3) 低液限黏土通过激光粒度仪法和密度计法得出的百分含量具有较高的相关性, 表明两种试验方法可以进行转化, 回归方程及相关系数如表 4 所示。

参考文献

- [1] 殷宗泽. 土工原理[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007.
- [2] 中华人民共和国交通运输部. JTG 3430 公路土工试验规程[S]. 北京: 人民交通出版社, 2020.
- [3] 王雪奎, 朱耀庭, 张嘉莹, 袁方龙, 王大永. 激光粒度分析仪法和密度计法在土工颗粒分析试验中的对比研究[J]. 中国港湾建设, 2020(5): 40-43.
- [4] 尤帆, 耿向. 筛分法和激光粒度法联合测定鲁源碎屑岩粒度[J]. 计量学报, 2021(3): 380-387.
- [5] 樊亮, 林江涛, 李永振. 与沥青胶浆性能相关的矿粉颗粒表征参数[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2021, 45(1): 82-87.
- [6] 王保田, 黄待望, 董薇, 张海霞, 陈一新. 激光粒度仪颗粒分析试验应用研究[J]. 三峡大学学报, 2015(6): 34-37.
- [7] 张建卫. 基于激光粒度分布仪的土工试验颗粒分析参数控制研究[J]. 西部探矿工程, 2021, 33(9): 7-8+11.