

不同分散剂对红黏土粒度分布的影响

董 薇¹, 黄待望², 陆 洋¹, 张 鹏¹, 张子健¹

(1. 江苏建筑职业技术学院, 江苏 徐州 221116; 2. 中国电建集团 华东勘测设计研究院有限公司, 杭州 311122)

摘要:红黏土由于土中游离氧化铁的存在,具有特殊的团粒结构。对于用密度计法进行红黏土的颗粒分析试验,各类规范中均建议加入分散剂。为更好评估土样分散的效果,运用分形理论,用分维值这一参数来描述土颗粒粒度特征。利用江西某地的红黏土,分别进行加入不同种类分散剂后的颗粒分析试验。结果表明,试样中加入六偏磷酸钠溶液作为分散剂后,得到的分维值较大,土颗粒集合体更分散。可见不同分散剂对于试验用红黏土的分散效果相差较大,加入适宜的分散剂才能更好地得到红黏土的实际粒度分布情况。试验结论对进一步认识和掌握红黏土的工程性质具有一定意义。

关键词:红黏土;粒度;六偏磷酸钠;分形;分维

中图分类号:TU411.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-1807(2022)04-0320-06

红黏土由于土中游离氧化铁的存在,具有特殊的团粒结构。土的粒度成分影响土的许多性质^[1-2]。在天然状态下,游离氧化铁包裹在黏土矿物颗粒表面,使得土颗粒未能充分分散,从而呈现出“假粉性”或“假砂性”的粒度分布特征。对红黏土试样采用密度计法进行颗粒成分分析时,需要加入分散剂,以破坏黏土颗粒的团聚效应,更能反映土颗粒成分真实粒径。对于颗分试验加入的分散剂种类和浓度,则存在一定的异议^[3-10]。

在已有研究中,多以颗粒级配曲线和黏粒含量占比来评估土的分散效果优劣。红黏土的物质组成复杂,只用颗分曲线和黏粒含量来评估红黏土的粒度成分组成,不够全面,需要新的参数指标,从而能更有效地描述红黏土的粒度成分特征。根据分形几何理论,土体可看作一个自组织系统,粒度分布实质上描述的是土体系统物质组成的空间结构,而分维大小与土的成因和工程性质密切相关,不仅能反映土颗粒大小,还能反映土颗粒之间的联结情况,因此可以用分维值作为参数指标来描述土的粒度分布^[11-13]。依据分形理论,用分维值作为指标,能更准确评估土的分散效果。

本文通过对粒径小于 0.075 mm 的土颗粒进行密度计法颗粒分析试验,并对加入不同分散剂的试样颗分试验结果进行分析,运用分形理论,可以得

到加入不同分散剂的土粒度分维值。用分维值这一参数来描述土颗粒粒度特征,可更准确地比较不同分散剂的分散效果,从而进一步阐述六偏磷酸钠作为分散剂对于红黏土粒度分布影响的本质。

1 土粒度分维的计算方法

已有研究表明,黏性土的颗粒粒度具有线性分形结构,可以用分维来描述黏性土粒度分布特征^[13-14]。确定土的粒度分维值有多种方法^[15-16],如依据 Mandelbrot 提出的计算公式确定的数颗粒数法和质量法,依据 Scoot W Tyler 提出的计算公式确定的计算颗粒数法。采用质量法来确定土的粒度分维值时,是依据对于土颗粒粒度而言,在双对数坐标上绘制颗粒大小级配曲线,如果小于某粒径的颗粒质量百分数和粒径之间呈线性关系,那么直线的斜率就是粒度的分维值。即:

对于土的颗粒组成来说,设颗粒的直径为 r ,直径大于 r 的颗粒数目为 $N(r)$, $P(r)$ 为粒径 r 的分布密度函数, D 即为粒度的分维,若

$$N(\geq r) = \int_r^{\infty} P(r) dr \propto r^{-D} \quad (1)$$

对公式求导,则有

$$dN \propto r^{-D-1} dr \quad (2)$$

设 $M(r)$ 为小于 r 粒径的颗粒累积质量, M 为颗粒总质量,如果

收稿日期:2021-12-03

基金项目:2021 年江苏省大学生创新创业训练计划项目(202110849026Y);江苏建筑职业技术学院 2020 年校级科研立项项目(JYA320-14)。

作者简介:董薇(1992—),女,湖北黄冈人,江苏建筑职业技术学院,讲师,硕士,研究方向为特殊土路基与边坡稳定。

$$\frac{M(r)}{M} \propto r^b \tag{3}$$

对公式求导,则有

$$dM \propto r^{b-1} dr \tag{4}$$

又因为

$$dM \propto r^3 dN \tag{5}$$

则有

$$r^{b-1} dr \propto r^3 \cdot r^{-D-1} dr \tag{6}$$

那么, $D=3-b$ 。

而通过颗粒分析试验,可以得到颗粒大小级配曲线。颗粒大小级配曲线绘制在半对数坐标上,以小于某粒径的颗粒质量百分数为纵坐标,以粒径为横坐标,其中横坐标为对数坐标。因此采用质量法确定分维值可直接利用颗分试验的结果来进行计算,故本文采用质量法来确定土的粒度分维值。将颗粒分析试验结果的坐标系转化为双对数坐标,通过双对数坐标下颗粒大小级配曲线图,可得到 $\ln \frac{M(r)}{M} - r$ 的线性关系, $\ln \frac{M(r)}{M} - r$ 的关系线为分维线,分维线的斜率即为分维值。

2 不同浓度分散剂下红黏土粒度的分布特征

本次试验用土取自江西省吉安市,红黏土在该地区广泛分布。本试验用土经过试验测定液限含水率为 51.4%,塑性指数为 20.9,按《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020)推荐的细粒土分类方法,可判定为高液限粉土。

本次试验参照《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020)中的密度计法进行,采用甲种密度计进行试验。将土样风干,然后过 0.075 mm 的筛,取筛分后的土样 30 g 进行试验。将试样倒入锥形瓶,注入纯水 200 mL 浸泡过夜,按试验设计加入不同种类的分散剂,稍加摇晃后煮沸 40 min。冷却后将悬液倒入烧杯静置 1 min,将上部悬液过 0.075 mm 的筛后倒入容量为 1 000 mL 的量筒中,烧杯中沉淀下来的土用玻璃棒研磨后加入静置 1 min,再将上部悬液过 0.075 mm 的筛后倒入量筒,如此反复,直至杯中不再有沉土。再继续向量筒中注入纯水至恰好 1 000 mL。用搅拌器往返约 30 次在量筒内上下搅拌悬液,使其分布均匀。取出搅拌器后,开动秒表,分别经过 0.5、1、5、15、30、60、120、1 440 min 前 10~20 s 后,将密度计小心放入量筒内,到时间读取密度计读数。读数准确至 1,估读至 0.5。最后根据公式计算粒径和小于某粒径的土质量分数,绘制颗粒大小级配曲线。

规范和已有研究^[3-6]推荐的分散剂主要有 4% 六偏磷酸钠、4% 草酸钠、2% 氢氧化钠、1% 硅酸钠。因此,先进行不加分散剂的红黏土颗粒分析试验,后分别对加入浓度为 4% 六偏磷酸钠、4% 草酸钠、2% 氢氧化钠、1% 硅酸钠作为分散剂的红黏土试样进行颗粒分析试验。

2.1 不加分散剂情况下,红黏土粒度分布特征

不加分散剂情况下,利用密度计法得到的红黏土颗粒大小级配曲线,如图 1 所示。

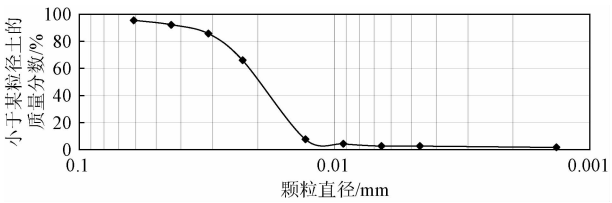


图 1 土颗粒级配曲线

由图 1 可看出,未加分散剂情况下,粒径小于 0.075 mm 的红黏土颗粒,粒径主要分布在 0.01~0.075 mm,且能看出这部分的土颗粒级配很不好。粒径小于 0.01 mm 的土颗粒,级配曲线表现出近似为直线的特征。

将坐标系转化为双对数坐标,通过双对数坐标下颗粒大小级配曲线图(图 2),可得到 $\ln \frac{M(r)}{M} - r$ 的线性关系,从而确定土的粒度分维值。

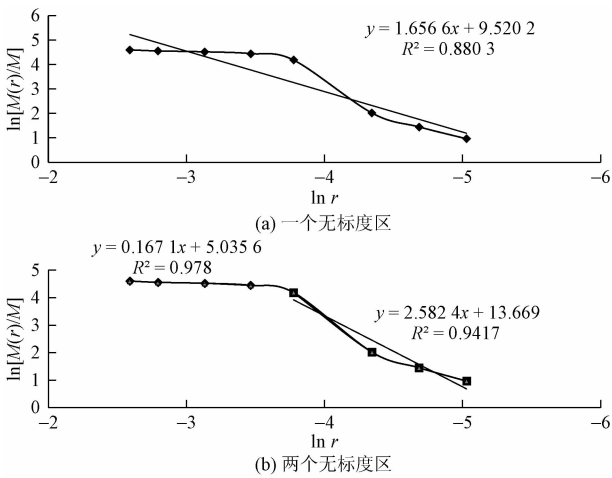


图 2 双对数坐标下红黏土粒度分布

由图 2 可以看出,双对数坐标下,不加分散剂的红黏土粒度分布,若按一个无标度区看, $\ln \frac{M(r)}{M} - r$ 的线性相关系数只有 0.880 3,相关性较差。若按两个无标度区分析, $\ln \frac{M(r)}{M} - r$ 的线性相关系数分别

达到 0.978 和 0.941 7,相关性良好。此时,红黏土 粒度分维特征见表 1。

表 1 红黏土粒度成分与分维成果

颗粒含量/%					无标度区	<i>b</i>	<i>D</i>	相关系数
0.075~0.05 mm	0.05~0.01 mm	0.01~0.005 mm	0.005~0.002 mm	<0.002 mm	一个	1.656 6	1.343 4	0.880 3
6.1	88.7	2.5	0.8	1.9	两个	1	0.167 1	0.978
						2	2.582 4	0.941 7

由表 1 可见,本试验用土黏粒含量为 2.7%。土样粒度分布的分维线存在两个无标度区,一区的分维值为 2.832 9,二区的分维值为 0.417 6。若按一个无标度区分析土样分维线,则得到的分维值为 1.343 4。

2.2 加不同分散剂情况下,红黏土粒度分布特征

加入浓度为 4%六偏磷酸钠、4%草酸钠、2%氢氧化钠、1%硅酸钠作为分散剂,利用密度计法得到的颗粒大小级配曲线如图 3 所示。

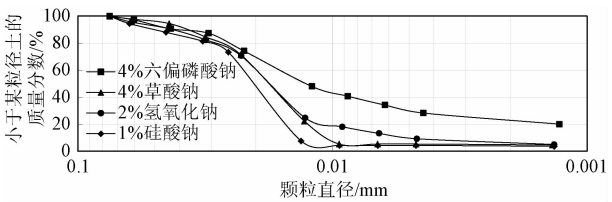


图 3 加入不同分散剂后土颗粒级配曲线

由图 3 可看出,加入 4%的六偏磷酸钠作为分散剂后,土样的级配曲线相比不加分散剂的土样得到了较大的改善。对比图 3 中加入不同分散剂后的级配曲线,可知加入六偏磷酸钠后,小于 0.01 mm 粒径的土颗粒含量明显上升。加入氢氧化钠后,小于 0.01 mm 粒径的土颗粒含量也有所上升,但比六偏磷酸钠上升量少。加入草酸钠和硅酸钠的试样,小于 0.01 mm 粒径的土颗粒含量只是略有上升。细粒含量的增加意味着分散剂起到的分散胶体的作用越大,可见加入六偏磷酸钠溶液作为分散剂后,能对试验用土取得较好的分散效果。

下面分别将加入 4%六偏磷酸钠、4%草酸钠、

2%氢氧化钠、1%硅酸钠作为分散剂的红黏土颗粒分析试验得到的颗粒级配曲线的坐标系转化为双对数坐标,然后通过双对数坐标下颗粒大小级配曲线图得到 $\ln \frac{M(r)}{M} - r$ 的线性关系,从而确定加入不同种类分散剂后红黏土的粒度分维值。

2.2.1 加入 4%的六偏磷酸钠溶液作为分散剂

加入 4%的六偏磷酸钠溶液后,得到的双对数坐标下颗粒大小级配曲线如图 4 所示。

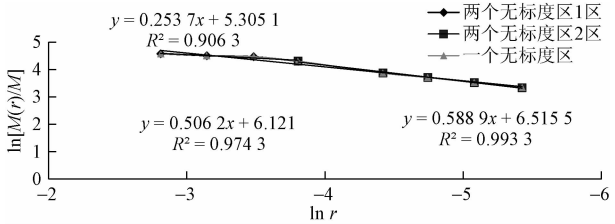


图 4 加入 4%六偏磷酸钠溶液后双对数坐标下红黏土粒度分布

由图 4 可以看出,双对数坐标下,加入 4%六偏磷酸钠溶液后的红黏土粒度分布,若按一个无标度区看, $\ln \frac{M(r)}{M} - r$ 的线性相关性为 0.974 3,若按两个无标度区分析, $\ln \frac{M(r)}{M} - r$ 的线性相关系数分别达到 0.906 3 和 0.993 3。按一个无标度区来分析,小于某粒径的颗粒质量百分数和粒径之间的线性相关性就非常好。可见加入 4%六偏磷酸钠溶液后的红黏土土样分维线只存在一个无标度区。此时,红黏土粒度分维特征见表 2。

表 2 加入 4%六偏磷酸钠溶液后的红黏土粒度成分与分维成果

颗粒含量/%			无标度区	<i>b</i>	<i>D</i>	相关系数
0.075~0.005 mm	0.005~0.002 mm	<0.002 mm	一个	0.506 2	2.493 8	0.974 3
70.7	5.9	23.4	两个	1	0.253 7	0.906 3
				2	0.588 9	0.993 3

由表 2 可见,加入 4%六偏磷酸钠溶液后红黏土试样黏粒含量为 29.3%。土样粒度分布的分维线存在一个无标度区,得到的分维值为 2.493 8。若参考不加分散剂时土样级配曲线,按两个无标度区

考虑土粒度分布的分维线,则一区的分维值为 2.746 3,二区的分维值为 2.411 1。

2.2.2 加入 4%草酸钠溶液作为分散剂

加入 4%草酸钠溶液后得到的双对数坐标下颗

粒大小级配曲线如图 5 所示。

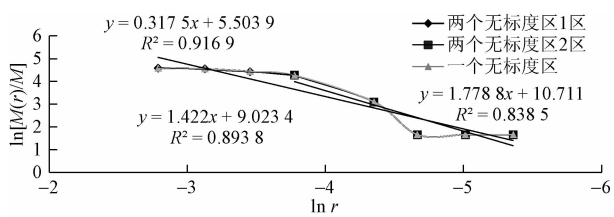


图 5 加入 4%草酸钠溶液后双对数坐标下红黏土粒度分布

表 3 加入 4%草酸钠溶液后的红黏土粒度成分与分维成果

颗粒含量/%			无标度区		<i>b</i>	<i>D</i>	相关系数
0.075~0.005 mm	0.005~0.002 mm	<0.002 mm	一个		1.422	1.578	0.892 8
94.7	0.6	4.7	两个	1	0.317 5	2.682 5	0.916 9
				2	1.778 8	1.221 2	0.838 5

由表 3 可见,加入 4%草酸钠溶液后红黏土试样黏粒含量较低,仅为 5.3%。土样粒度分布的分维线若按一个无标度区分析,得到的分维值为 1.578。若按两个无标度区考虑土粒度分布的分维线,则一区的分维值为 2.682 5,二区的分维值为 1.221 2。

2.2.3 加入 2%氢氧化钠作为分散剂

加入 2%氢氧化钠溶液后得到的双对数坐标下颗粒大小级配曲线如图 6 所示。

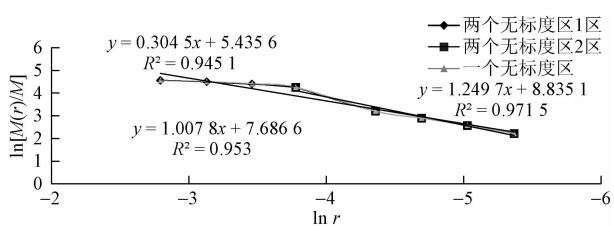


图 6 加入 2%氢氧化钠溶液后双对数坐标下红黏土粒度分布

表 4 加入 2%氢氧化钠溶液后的红黏土粒度成分与分维成果

颗粒含量/%			无标度区		<i>b</i>	<i>D</i>	相关系数
0.075~0.005 mm	0.005~0.002 mm	<0.002 mm	一个		1.007 8	1.992 2	0.953
90.3	4.4	5.3	两个	1	0.304 5	2.695 5	0.945 1
				2	1.249 7	1.750 3	0.971 5

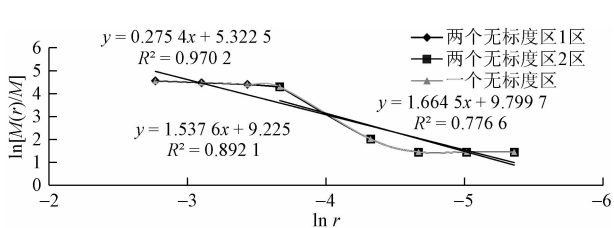


图 7 加入 1%硅酸钠溶液后双对数坐标下红黏土粒度分布

由图 5 可以看出,双对数坐标下,加入 4%草酸钠溶液后的红黏土粒度分布,若按一个无标度区看, $\ln \frac{M(r)}{M} - r$ 的线性相关性为 0.893 8,若按两个无标度区分析, $\ln \frac{M(r)}{M} - r$ 的线性相关系数分别为 0.916 9 和 0.838 5。无论是一个标度区还是两个标度区,小于某粒径的颗粒质量百分数和粒径之间的线性相关性都不是很好。此时,红黏土粒度分维特征见表 3。

由图 6 可以看出,双对数坐标下,加入 2%氢氧化钠溶液后的红黏土粒度分布,若按一个无标度区看, $\ln \frac{M(r)}{M} - r$ 的线性相关性为 0.953,若按两个无标度区分析, $\ln \frac{M(r)}{M} - r$ 的线性相关系数分别为 0.945 1 和 0.971 5。可见试验土样粒度分布的分维线存在一个无标度区,小于某粒径的颗粒质量百分数和粒径之间的线性相关性较好。此时,红黏土粒度分维特征见表 4。

由表 4 可见,加入 2%氢氧化钠溶液后红黏土试样黏粒含量为 9.7%。土样粒度分布的分维线存在一个无标度区,得到的分维值为 1.992 2。若按两个无标度区考虑土粒度分布的分维线,则一区的分维值为 2.695 5,二区的分维值为 1.750 3。

2.2.4 加入 1%硅酸钠溶液作为分散剂

加入 1%硅酸钠溶液后得到的双对数坐标下颗粒大小级配曲线如图 7 所示。

由图 7 可以看出,双对数坐标下,加入 1%硅酸钠溶液后的红黏土粒度分布,若按一个无标度区看, $\ln \frac{M(r)}{M} - r$ 的线性相关性为 0.892 1,若按两个无标度区分析, $\ln \frac{M(r)}{M} - r$ 的线性相关系数分别为 0.970 2 和 0.776 6。可见按一个标度区和按两个标度区分析的二区,线形相关性较差。此时,红黏

土粒度分维特征见表 5。

由表 5 可见,加入 1%硅酸钠溶液后红黏土试样黏粒含量为 4.3%。土样粒度分布的分维线存在

一个无标度区,得到的分维值为 1.462 4。若按两个无标度区考虑土粒度分布的分维线,则一区的分维值为 2.724 6,二区的分维值为 1.335 5。

表 5 加入 1%硅酸钠溶液后的红黏土粒度成分与分维成果

颗粒含量/%			无标度区		b	D	相关系数
0.075~0.005 mm	0.005~0.002 mm	<0.002 mm	一个		1.537 6	1.462 4	0.892 1
95.7	0.5	3.8	两个	1	0.275 4	2.724 6	0.970 2
				2	1.664 5	1.335 5	0.776 6

2.3 不同种类分散剂效果下红黏土粒度分布特征分析

由 2.1 和 2.2 节的试验结果可见,在不加分散剂时,土样粒度分布的分维线出现明显的两个无标度区,按一个无标度区分析的线性相关系数小于按两个无标度区分析的一区和二区的相关系数。加入分散剂后,土样按一个无标度区分析的线性相关系数均处于按两个无标度区分析的一区和二区的相关系数之间。加入 4%的六偏磷酸钠溶液和 2%氢氧化钠溶液后,土样粒度分布的分维线均出现明显的一个无标度区。而加入 4%草酸钠溶液和 1%硅酸钠溶液后,土样粒度分布出现 3 个无标度区的趋势,所以当按两个无标区分析时,一区线性相关性较好,而二区的线性相关系数较小。

分析 2.1 和 2.2 节试验结果得到的分维值,可见无论是否加分散剂,按一个无标度区分析的分维值都处于按两个无标度区分析的一区和二区的分维值之间。按一个无标度区分析,加入分散剂后土样粒度的分维值均大于不加分散剂时的分维值。对加入 4 种不同分散剂的土样的分维值进行比较,分维值:六偏磷酸钠>氢氧化钠>草酸钠>硅酸钠>不加分散剂,这也与颗分试验得到的黏粒含量排序一致。按两个无标度区分析的分维值,没有明显的规律性,只能看出加入分散剂后二区的分维值在向一区的分维值接近。一区的颗粒是粒径较大的颗粒,二区是粒径较小的颗粒,二区的分维值在向一区的分维值接近,表征大的颗粒得到了一定的分散。若分维线只出现一个无标度区,则表征大的颗粒集合体得到了较好的分散。分维值越大,表征土颗粒间的黏结作用减弱,土颗粒集合体越分散,土样的分散效果越好。

红黏土粒团之间的“桥”式联结容易被外力破坏,但粒团内部游离氧化铁胶体包裹在黏土颗粒表面,较难被外力破坏。对红黏土试样采用密度计法进行颗分试验时,仅靠玻璃棒研磨无法破坏其团粒结构,得到的分维值小。加入六偏磷酸钠溶液后,

水溶液中电离出的钠离子被黏粒优先吸附,增大了黏粒的扩散层,使得黏粒相互分离。同时,吸附在黏粒表面的六偏磷酸钠为大分子物质,形成的吸附层较厚,从而阻止黏粒聚结。加入六偏磷酸钠溶液会提高溶液的 pH,降低了游离氧化铁和黏粒的相互吸引。六偏磷酸钠电离出的磷酸根离子还可络合铁离子形成稳定络合物,破坏氧化铁的胶结作用。所以在红黏土试样中加入六偏磷酸钠溶液后,土颗粒之间的黏结作用被破坏,使得土颗粒集合体更加分散,从而表征出分维值越大。

3 结论

通过研究加入不同分散剂后的红黏土的粒度分布特征后,可得到以下结论:

1)红黏土粒度具有较好的线性分形结构,运用分形理论来分析红黏土的分散效果,不仅能反映土颗粒大小,还能反映土颗粒之间的联结情况。未加分散剂的红黏土颗粒,分维线出现较明显的两个无标度区,而加入 4%的六偏磷酸钠溶液和 2%氢氧化钠溶液后,红黏土粒度分布的分维线,趋近于一个无标度区。分维线只出现一个无标度区,表征大的颗粒集合体得到了较好的分散。分维值作为指标参数,可很好地评价红黏土粒度分布特征。分维值越高,表征土颗粒间的联结越弱,土粒集合体越分散,土中细粒含量越高。

2)试验所用的红黏土试样加入 4%草酸钠溶液和 1%硅酸钠溶液后,粒度分布的分维线呈现出近似 3 个无标度区,分散效果较差。

3)对试验所用红黏土试样,颗分试验得到的粒度分布的分维值:六偏磷酸钠>氢氧化钠>草酸钠>硅酸钠>不加分散剂,可知采用 4%六偏磷酸钠溶液作为分散剂,此时土样的分散效果最好。

参考文献

[1] 陈青生,李宇轩,肖衡林,等. 考虑颗粒级配影响的高聚物改良钙质砂抗剪强度特性试验研究[J]. 科学技术与工程,2020,20(28):11718-11724.

[2] 孙春光. 颗粒形状对交通荷载条件下砂土力学性能的影响分析[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(10): 260-266.

[3] 中华人民共和国交通运输部. 公路土工试验规程: JTG 3430—2020[S]. 北京: 人民交通出版社, 2021.

[4] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.

[5] 李明和, 符必昌, 廖勇军, 等. 不同分散剂对红土粒度成分的影响[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(16): 300-303.

[6] 董薇, 王保田, 姚燕, 等. 不同分散剂对红黏土颗粒分析试验的影响[J]. 科学技术与工程, 2015, 15(19): 165-168, 187.

[7] 卢瑞娜, 梁仁旺. 分散剂浓度和超声震荡对富伊利石矿物的细粒土的颗粒级配的影响[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(9): 3747-3753.

[8] 谷建晓, 王勇, 梁靖. 六偏磷酸钠浓度对柳州红黏土颗分试验的影响[J]. 人民长江, 2017, 48(S1): 241-243.

[9] 刘亦凡, 鲁盈, 李炎军, 等. 黏土-水悬浮体系热滚老化后的分散性[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(35): 148-152.

[10] 韦丽, 容洪流, 李军, 等. 北部湾近海洪冲积低液限粉土颗粒组成试验研究[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(14): 247-251.

[11] 黄英, 何发祥, 符必昌, 等. 红土颗粒粒度的分维变化特征[J]. 云南工业大学学报, 1998(3): 56-62.

[12] 刘松玉, 方磊, 陈浩东. 论我国特殊土粒度分布的分形结构[J]. 岩土工程学报, 1993(1): 23-30.

[13] 刘松玉, 方磊. 试论粘性土粒度分布的分形结构[J]. 工程勘察, 1992(2): 1-4.

[14] 马琳, 王清, 原国红. pH 值对红土粒度成分影响的分形几何研究[J]. 水文地质工程地质, 2007(2): 41-44.

[15] 乔春元, 韩爱民, 丁长阳. 南京下蜀黄土颗粒分形研究[J]. 四川地质学报, 2009, 29(3): 344-348.

[16] 张凌, 王宝军, 施斌. 土粒度分维的确定方法探讨[J]. 水文地质工程地质, 1999(5): 45-47.

Effect of Different Dispersants on Grain Size Distribution of Red Clay

DONG Wei¹, HUANG Daiwang², LU Yang¹, ZHANG Peng¹, ZHANG Zijian¹

(1. Jiangsu Vocational Institute of Architectural Technology, Xuzhou Jiangsu 221116, China;

2. China Electric Power Construction Group East China Investigation and Design Research Institute Co., Hangzhou 311122, China)

Abstract: Red clay has a special aggregate structure due to the existence of free iron oxide in the soil. It is recommended to add dispersants in various specifications for particle analysis of red clay by densitometry. In order to better evaluate the dispersion effect of soil samples, fractal theory is used to describe the particle size characteristics of soil particles with fractal dimension. The results show that the fractal dimension value is larger and the soil particle aggregate is more dispersed when sodium hexametaphosphate solution is used as dispersant. It can be seen that the dispersion effects of different dispersants on the red clay used in the experiment are quite different, and the actual particle size distribution of red clay can be better obtained by adding appropriate dispersants. The experimental results are of great meaning for further understanding and mastering the engineering properties of red clay.

Keywords: red clay; particle size; sodium hexametaphosphate; fractal; fractal dimension