

文章编号: 1008 - 2786 - (2019)2 - 222 - 08

DOI: 10. 16089/j. cnki. 1008 - 2786. 000416

桂东南容县花岗岩残积土粒度分形与物理参数的关系

廖丽萍^{1, 2, 3}, 文海涛⁴, 赵艳林¹, 杨云川^{1, 2, 3*}, 陈立华¹

(1. 广西大学 土木建筑工程学院, 南宁 530004; 2. 工程防灾与结构安全教育部重点实验室, 南宁 530004;
3. 广西防灾减灾与工程安全重点实验室, 南宁 530004; 4. 广西壮族自治区地质环境监测总站, 广西 桂林 541000)

摘 要: 桂东南容县花岗岩残积土滑坡灾害频发。为明确残积土粒度组成以便揭示滑坡形成机制, 文中基于花岗岩残积土的土工试验数据和详查资料, 利用分形理论揭示四个深度(0 ~ 30 cm、30 ~ 50 cm、50 ~ 70 cm、滑动面(1 ~ 3 m))土体粒度分形特征与颗粒含量、物理性质参数的关系。结果表明:(1)花岗岩残积土主要由细砾(粒径 2 ~ 5 mm)和砂粒(粒径 0.075 ~ 2 mm)组成, 粒度分布在无标度区间[0.075, 5]内具有一重分形特征;(2)残积土平均分形维数由大即小依次是: D_{50-70} (2.7244) > $D_{\text{滑动面}}$ (2.6910) > D_{0-30} (2.6893) > D_{30-50} (2.6480);(3)分形维数与粉砂含量呈极显著正相关, 正相关性随深度增加而增大, 与细砾和粗砂含量呈负相关性, 即分形维数越大, 粉砂含量越高, 而细砾和粗砂含量越低;(4) D_{30-50} 、 $D_{\text{滑动面}}$ 与渗透系数、干密度呈显著负相关。

关键词: 容县; 花岗岩残积土; 分形特征; 物理参数

中图分类号: P642

文献标志码: A

1 引言

广西东南部容县是花岗岩残积土滑坡的高易发区^[1-3]。花岗岩残积土作为花岗岩原地风化残留堆积物^[4], 虽然在天然条件下呈硬塑状态且抗剪强度高^[5, 6], 但是在局地强降雨与台风降雨的激发作用下, 频繁地崩解软化破坏^[7-9], 诱发群发性的滑坡灾害, 不仅造成生命财产损失与工程损毁, 而且还制约着当地的经济发展与生态环境恢复。

残积土的物理力学性质控制其失稳破坏进程, 且在很大程度上受其粒度组成的影响^[10-14]。分析该区域残积土的粒度组成及其与物理性质参数的关

系不仅是进一步揭示不同类型残积土工程力学特性的基础, 而且也是有效开展残积土滑坡形成机理研究的关键基础所在^[15, 16]。目前, 颗粒级配曲线和分形维数是描述土体粒度组成的两种方式。由于分形维数既具备传统粒径级配曲线反映各粒级颗粒含量的功能^[17, 18], 又能通过对结构特征的定量化描述, 让复杂的结构特征得以简化处理^[15], 而且还可通过线性拟合程度判断级配的优劣^[19], 避免传统方法中分界粒径的界定与区分^[20]。因此, 分形维数已作为最重要指标用于描述泥石流与滑坡的颗粒组成与粒度分形特征^[21-26]。然而, 关于花岗岩残积土分形特征的研究尚鲜有报道。笔者在前人的基础上, 以容县花岗岩残积土为研究对象, 采用质量分形维数的

收稿日期(Received date): 2017 - 8 - 18; 改回日期(Accepted date): 2019 - 02 - 19

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金(51609041); 广西科技厅基金(2018GXNSFAA138187); 广西教育厅基金(2018KY0027); 广西国土厅 2018 年项目(GXZC2018 - G3 - 19302 - JGYZ)。[National Natural Science Foundation of China(51609041); Natural Science Fund Project of Guangxi province of China(2018GXNSFAA138187); Project of the Education Department of Guangxi Province of China(2018KY0027); Project of the Department of Land and Resources of Guangxi Province of China(GXZC2018 - G3 - 19302 - JGYZ)]

作者简介(Biography): 廖丽萍(1985 -), 女, 博士, 讲师, 主要研究方向: 地质灾害机理与防治技术。[LIAO LiPing(1985 -), female, Ph. D., lecturer, research on mechanism and the prevention technology of geological hazards] E-mail: 011lp@163.com

* 通讯作者(Corresponding author): 杨云川(1982 -), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向: 水文与水资源。[YANG Yunchuan(1982 -), male, Ph. D., associate professor, research on hydrology and water resource] E-mail: yyunchuan@gxu.edu.cn

计算模型^[17, 18],以残积土的颗分数据为基础,分析残积土的粒度分形特征,探讨分形维数与土体物理性质参数的关系,为后续进一步分析其工程力学特性,深入探讨粒度组成对滑坡起动机理的影响奠定基础。

2 材料与方法

2.1 研究区概况

容县(东经 110° 15' 00" ~ 110° 53' 00", 北纬 22° 27' 00" ~ 23° 07' 00")位于广西东南部,隶属玉林市,面积为 2257 km²。区域属亚热带季风气候,降雨量充沛,年平均降雨量为 1737.4 mm,最低年降雨量为 1087.3 mm,最高达 2314.7 mm,4—9 月的降雨

量约占年降雨量的 78.6%。研究区的岩浆岩面积为 1260.09 km²,占全县总面积的 55.83%,岩性主要为花岗岩(面积为 1219.06 km²),其地质年代为印支~华力西期、印支期、燕山期。沉积岩的面积次之,变质岩面积最小。因为花岗岩残积土滑坡在六王镇集中分布,呈群发性和突发性特征^[2-3](见图 1),所以本文重点分析该镇滑坡所对应的花岗岩残积土。

2.2 研究数据与计算方法

本文所采用的颗分数据和物理性质参数来源于:广西地质环境监测总站 2014 年对容县六王镇 9 个村的典型花岗岩残积土滑坡点进行工程地质钻探和土工试验。其中,滑坡的主滑方向有 3 条纵向的钻探剖面,每条剖面有 2 个钻孔,钻探深度至少穿过

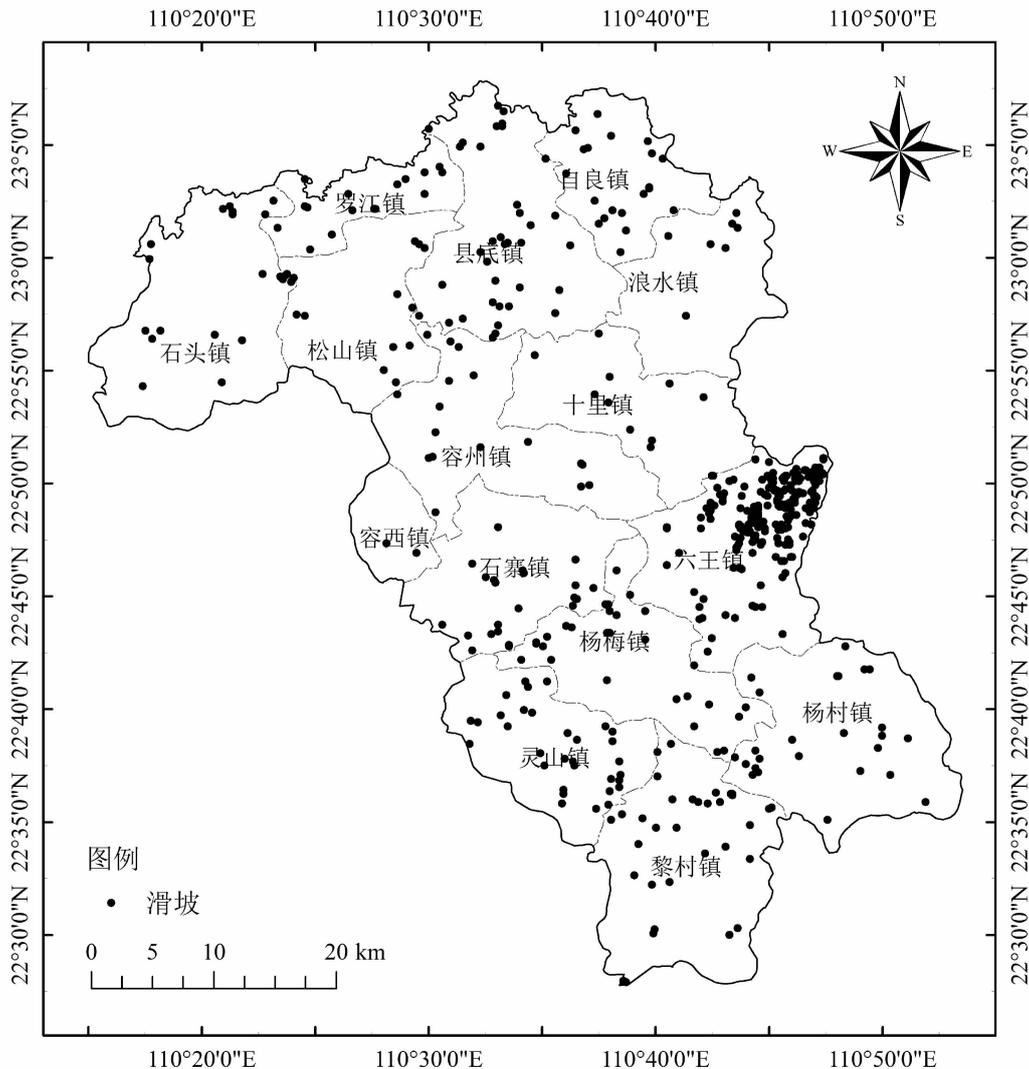


图 1 研究区与滑坡分布图

Fig. 1 Study area and the distribution map of landslides

滑动面 1~2 m。

容县六王镇花岗岩残积土滑坡主要为小型的浅层滑坡,其滑动面仍位于残积土层内,深度为 1~3 m^[2-3]。因此,钻孔深度为 6 m(见图 2)。本文仅选取四个深度(0~30 cm,30~50 cm,50~70 cm 和滑动面位置)的颗分数据进行分析。



图 2 钻探出露的花岗岩残积土

Fig. 2 Exposed granite residual soil from drilling

假设土体颗粒粒径为 r , 粒径 $< r$ 的颗粒质量百分含量为 $N(r)$, 则 r 与 $N(r)$ 满足分形的一般定义式^[18]:

$$N(r) \propto r^D \quad (1)$$

对(1)式两边求导得

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

颗粒大小与频度之间满足经验关系 Weibull 分布

$$M(<r)/M = 1 - \exp[1 - (r/r_0)^b] \quad (3)$$

式中: $M(<r)$ 为所有粒径 $< r$ 颗粒的质量之和; M 为整个试样的质量; r_0 为试样的平均尺寸, b 为常数。当 $r < r_0$ 时,将指数函数进行 Taylor 级数展开,并略去二次项后得

$$M(<r)/M = (r/r_0)^b \quad (4)$$

对(4)两边求导可得

$$dM(<r) \propto r^{b-1} dr \quad (5)$$

颗粒数目的增加与颗粒质量之间存在下列关系

$$dM(<r) \propto r^3 dN(r) \quad (6)$$

联立式(2),(5),(6)可得土体粒度分形维数得计算式

$$D = 3 - b \quad (7)$$

式中: $M(<r)/M$ 为粒径 $< r$ 的颗粒累积百分比; b 为 $\lg[M(<r)/M] \sim \lg r$ 双对数曲线中拟合直

线的斜率; D 为分形维数即分形维数,反映土体颗粒组成,如 D 值越小,表示土体颗粒组成差异性越大,均匀度越差; D 越大,表示土体颗粒组成差异性越小,均匀度越好^[27]。

粒度分形特征只在无标度区内才存在^[18]。无标度区是指分形关系存在并成立的尺度范围,可根据 $\lg[M(<r)/M] \sim \lg r$ 双对数曲线的相关系数 R^2 来划分。当 $R^2 \geq 0.90$ 时,无标度区是整个尺度范围,土体有一重分形特征;当 $R^2 < 0.90$ 时,曲线有一个拐点,且拐点相邻两直线段 R^2 均大于 0.90,斜率比例大于 2,则拐点对应的粒径为分界粒径,土体有二重分形特征^[13, 20]。

3 结果分析

3.1 花岗岩残积土颗粒分形特征

3.1.1 花岗岩残积土的颗粒组成与分形维数

花岗岩残积土主要矿物成分为石英、高岭石、少量云母和黑色矿物,以角砾粘土、砂(砾)质粘性土为主。残积土含有较多的亲水性矿物—高岭石,因此,残积土的抗水力侵蚀能力极弱,遇水易软化崩解。

本文将同一取样深度的颗分数据取平均值即得到残积土的平均粒度组成(见表 1)。由表 1 可知,四个取样深度残积土的颗粒组成均缺少中砾(粒径为 5~20 mm)与粗砾(粒径为 60~20 mm)两个粒组,粒度主要由细砾(粒径 2~5 mm)和砂砾(粒径 0.075~2 mm)组成,其中粒径 < 0.075 mm 的粉砂含量最高,为 24.31%~33.02%,其次是粗砂含量,为 20.04%~24.09%。粒度分布整体呈两边大、中间小的特征,即粒径 2~5 mm 的细砾含量、粒径 0.5~2 mm 粗砂含量、粒径 < 0.075 mm 的粉砂颗粒含量相对较多,而粒径为 0.075~0.5 mm 的中砂、细砂含量相对少。粒度特征决定了残积土的组构:土体骨架主要由砾粒、粗砂及部分中砂构成,粗颗粒之间主要被细砂、粉砂与游离氧化物包裹及填充实现联结,还有部分来自原岩矿物晶粒间的残存联结。结果表明:残积土粒度呈粗细颗粒均匀混杂的特征,这是花岗岩残积土有别于其他类型土,具有粘性土和砂类土的双重力学性状的一个重要原因。

由表 2 可知,四个取样深度残积土 $\lg[M(<r)/M] \sim \lg r$ 双对数曲线不存在拐点,相关系数 R^2

均 ≥ 0.90 ,分形维数平均值在 2.6000 ~ 2.7000 之间,标准差和变异系数分别在 6%、3% 之内,说明分形维数属于弱变异^[27],其离散程度小,土体粒度分布在无标度区间 $[0.075, 5]$ 内具有良好的统计自相似性,即一重分形特征。

图3是基于残积土的平均粒度组成数据绘制而成的 $\lg[M(<r)/M]$ 与 $\lg r$ 双对数曲线。由图3可知,残积土平均分形维数由大即小依次是: D_{50-70} (2.7244) $> D_{\text{滑动面}}$ (2.6910) $> D_{0-30}$ (2.6893) $> D_{30-50}$ (2.6480)。当取样深度为 0 ~ 50cm 时,分形维数平均值随着取样深度的增大而减小,说明 $\lg[M(<r)/M] \sim \lg r$ 的双对数曲线中拟合直线的斜率 b 随着深度增大而增大,主要原因是粗细颗粒的相对含量随深度发生变化,中砂和细砂含量增加,其余颗粒含量均减小。深度为滑动面的分形维数平均值较深度为 50 ~ 70 cm 的分形维数平均值小。深度为 50 ~ 70 cm 的分形维数最大,主要原因是该深度粒径 < 0.075 mm 的粉砂含量相对于其余三个深度较多,粉砂含量在分形维数中起主导作用。结果表明:残积土分形维数能反映土质粗细程度,土质越细

分形维数越大,土质越粗分形维数越小。

3.1.2 分形维数与土体颗粒质量百分含量的关系

表3~6分别反映四个取样深度残积土的分形维数 D 与各粒级颗粒含量 z 的关系。由表3~6可知,当深度为 0 ~ 30 cm 时,分形维数与细砾、粗砂、细砂含量均呈负相关关系,相关系数分别为 0.6518、0.0171、0.2787、0.1498,而分形维数与粉砂含量呈极显著正相关,相关系数为 0.9654。当深度为 30 ~ 50 cm 时,分形维数与细砾、粗砂含量呈显著负相关,相关系数分别为 0.97、0.8685、0.8849,而分形维数与中砂、细砂和粉砂含量呈正相关,相关系数分别为 0.7655、0.736、0.9654,其中分形维数与粉砂含量的相关性最显著。当深度为 50 ~ 70 cm 和滑动面时,分形维数与粉砂含量呈极显著正相关,相关系数分别为 0.9986、0.9266。结果表明:不同深度分形维数对各粒级土体颗粒含量的反映程度存在显著差异,其中分形维数对粉砂含量的依赖性均最大,即与粉砂含量呈极显著的正相关关系,且相关性随着深度增加而增大;其次是细砾和粗砂含量,即分形维数越大,说明粉砂含量越高,细砾和粗砂的含量

表1 花岗岩残积土的平均粒度组成

Tab.1 Average particle size of granite residual soil

取样深度 /cm	各粒组(mm)质量百分含量平均值(%)						渗透系数 平均值 /E ⁻⁴	干密度 平均值 /(g/cm ³)
	砾石			砂粒				
	细	粗	中	细	粉			
	2~5	1~2	0.5~1	0.25~0.5	0.075~0.25	<0.075		
0~30	20.11	3.19	24.09	13.67	9.91	29.02	6.76	1.45
30~50	16.66	3.69	22.85	19.29	13.20	24.31	2.62	1.33
50~70	15.19	2.79	20.04	16.51	12.46	33.02	8.73	1.48
滑动面	13.47	4.61	21.78	17.87	13.10	29.16	4.03	1.35

表2 花岗岩残积土的分形维数 D

Tab.2 Fractal dimension D of granite residual soil

取样深度/cm	分形维数 D						
	平均值	最大值	最小值	标准差	偏度	变异系数	
0~30	2.6893	2.7398	2.6250	4.00%	0.0333	1.52%	
30~50	2.6480	2.6798	2.5813	5.44%	-1.6700	2.20%	
50~70	2.7244	2.7853	2.6765	5.81%	1.5300	2.17%	
滑动面	2.6910	2.7425	2.6441	3.07%	0.1862	1.16%	

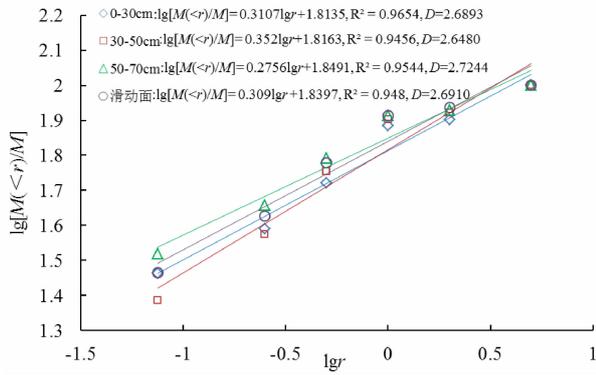


图3 $\lg[M(<r)/M]$ 与 $\lg r$ 的双对数曲线

Fig. 3 A double logarithmic curve between $\lg[M(<r)/M]$ and $\lg r$

表3 分形维数 D 与各粒级颗粒含量 z 的关系(0 ~ 30 cm)

Tab. 3 Relationship between fractal dimension D and each particle content z (a depth of 0 ~ 30 cm)

方程 粒级	拟合方程	相关系数 R^2
细砾	$D = -0.0052z + 2.7907$	0.6518
粗砂	$D = -0.0036z + 2.6975$	0.0171
粗砂	$D = -0.0063z + 2.8382$	0.2787
中砂	$D = 0.0061z + 2.6026$	0.3836
细砂	$D = -0.0079z + 2.7644$	0.1498
粉砂	$D = 0.0075z + 2.4681$	0.9779

表4 分形维数 D 与各粒级颗粒质量含量 z 的关系(30 ~ 50 cm)

Tab. 4 Relationship between fractal dimension D and each particle content z (a depth of 30 ~ 50 cm)

方程 粒级	拟合方程	相关系数 R^2
细砾	$D = -0.0084z + 2.7839$	0.9700
粗砂	$D = -0.0804z + 2.9408$	0.8685
粗砂	$D = -0.023z + 3.1689$	0.8849
中砂	$D = 0.0712z + 1.2704$	0.7655
细砂	$D = 0.0106z + 2.5044$	0.7360
粉砂	$D = 0.0117z + 2.3589$	0.9880

越低,这一结果与砾石土、堆积土等其他土体分形维数的研究成果相一致^[13, 22]。由于桂东南地区降雨充沛,降雨可能是导致残积土中粉砂等细颗粒含量运移变化的关键诱发因素^[28, 29]。在雨水入渗过程中,粉砂一部分垂直入渗到坡体内部,一部分随壤中

流顺着坡向流出坡脚,分形维数会因粉砂运移流失而出现明显变化,在一定程度上可表征粉砂等细颗粒的流失状态。

表5 分形维数 D 与各粒级颗粒质量含量 z 的关系(50 ~ 70 cm)

Tab. 5 Relationship between fractal dimension D and each particle content z (a depth of 50 ~ 70 cm)

方程 粒级	拟合方程	相关系数 R^2
细砾	$D = -0.0048z + 2.7922$	0.7350
粗砂	$D = 0.0082z + 2.6961$	0.0528
粗砂	$D = -0.0148z + 3.0149$	0.9291
中砂	$D = -0.0023z + 2.7571$	0.0087
细砂	$D = 0.0093z + 2.6028$	0.7495
粉砂	$D = 0.0075z + 2.4703$	0.9986

表6 分形维数 D 与各粒级颗粒质量含量 z 的关系(滑动面)

Tab. 6 Relationship between fractal dimension D and each particle content z (a depth of sliding surface)

方程 粒级	拟合方程	相关系数 R^2
细砾	$D = -0.0029z + 2.7281$	0.2680
粗砂	$D = 0.0017z + 2.6812$	0.0107
粗砂	$D = -0.0081z + 2.8657$	0.7263
中砂	$D = 0.0017z + 2.6582$	0.0639
细砂	$D = 0.0043z + 2.6331$	0.0950
粉砂	$D = 0.0079z + 2.4591$	0.9266

3.2 分形维数与土体物理性质参数的关系

(1) 分形维数 D 与渗透系数 k 的关系

残积土渗透系数平均值为 $2.62E^{-4} \sim 8.62E^{-4}$ cm/s,属于弱~中等透水性土。由表7可见,四个深度的残积土分形维数与渗透系数均呈负相关关系,其中,深度30-50 cm和深度为滑动面的残积土分形维数与渗透系数的负相关关系最为显著,相关系数分别为0.9579、0.6835。这是因为分形维数在一定程度上能反映粉砂、细砂等细颗粒含量,分形维数越大,填充在粗颗粒之间的细颗粒的含量就越多,致使土体结构致密,渗透能力减弱。其余两个深度残积土的分形维数与渗透系数的相关性不显著,主要原因可能是残积土中细颗粒运移与流失,

致使土体出现水流粗化现象,导致某些部位的粗颗粒聚集、细颗粒缺失,而其他部位细颗粒聚集,土体的渗透能力受到一定影响,坡体内部渗流路径发生明显变化^[28, 29],从而导致渗透系数出现较大差异。

表7 分形维数 D 与渗透系数 k 的关系

Tab.7 Relationship between D and k

取样深度(cm)	拟合方程	相关系数
0~30	$D = -0.0069k + 2.7326$	0.5988
30~50	$D = -0.0809k + 2.8561$	0.9579
50~70	$D = -0.0034k + 2.7487$	0.2696
滑动面	$D = -0.0152k + 2.7504$	0.6835

(2) 分形维数 D 与干密度 ρ_d 的关系

由表8可见,四个深度的残积土的分形维数均与干密度呈负相关关系。其中,深度30~50 cm的残积土分形维数与干密度的负相关关系最为显著,相关系数为0.8997。这说明在该深度条件下,当分形维数为2.5813~2.6798时,干密度越大,相同体积中的固体颗粒越多,土体结构性增强,土体内部粗细颗粒能较好连结,分形维数越小。其余三个深度残积土的分形维数与干密度的相关性不显著,主要原因可能是不同深度土体组构特征存在细微差异,干密度的离散性较大。

表8 分形维数 D 与干密度 ρ_d 的关系

Tab.8 Relationship between D and ρ_d

取样深度(cm)	拟合方程	相关系数
0~30	$D = -0.1913\rho_d + 2.9638$	0.0407
30~50	$D = -0.479\rho_d + 3.2813$	0.8997
50~70	$D = -0.0312\rho_d + 2.76537$	0.0039
滑动面	$D = -0.4409\rho_d + 3.2852$	0.4759

4 结语与展望

(1) 桂东南容县花岗岩残积土粒度主要由细砾(粒径2~5 mm)和砂砾(粒径0.075~2 mm)组成,粒度分布呈两边大、中间小的特征,在无标度区间内[0.075, 5]内具有良好的统计自相似性,即一重分形特征;

(2) 粗细颗粒相对含量随深度变化,四个取样深度残积土的平均分形维数由大即小依次是:

$$D_{50-70}(2.7244) > D_{\text{滑动面}}(2.6910) > D_{0-30}(2.6893) > D_{30-50}(2.6480);$$

(3) 四个深度分形维数对各粒级颗粒含量的反映程度存在显著差异,其中分形维数对粉砂含量的依赖性均最大,即与粉砂含量呈极显著的正相关关系,且相关性随着深度增加而增大;其次是细砾和粗砂含量,即分形维数越大,说明粉砂含量越高,细砾和粗砂的含量越低。

(4) 深度30~50 cm和深度为滑动面的残积土分形维数与渗透系数、干密度呈负相关关系,其余深度残积土分形维数与渗透系数、干密度相关性不显著。

本文分析粒度分形特征及其物理性质指标的关系,为后续进一步分析其工程力学特性,探讨粒度组成对滑坡起动的的影响做准备。此外,作者将采集容县其他乡镇的残积土滑坡土样,进一步分析不同区域残积土的地质成因与物理性质的差异,探讨残积土的分形特征与工程力学特性,最终揭示粒度组成对滑坡起动的的影响。

参考文献(References)

- [1] 王志兵, 麦棠坤, 齐程. 容县压实花岗岩残积土的力学性质与微结构特性研究[J]. 水文地质工程地质, 2018, 45(5): 101-107. [WANG Zhibing, MAI Tangkun, QI Cheng. Shear strength and microstructure of compacted granite residual soils in Rong County [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2018, 45(5): 101-107]
- [2] 文海涛, 韦朝华, 廖丽萍, 等. 桂东南容县地质灾害发育与时空分布特征[J]. 水土保持通报, 2017, 37(5): 182-188, 197. [WEN Haitao, WEI Chaohua, LIAO Liping, et al. Occurrence and temporal-spatial distribution characteristics of geological hazards in Rongxian County in southeast Guangxi Zhuang Autonomous Region [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(5): 182-188, 197]
- [3] 韦朝华, 文海涛, 廖丽萍, 等. 桂东南花岗岩残积土边坡破坏特征与防治对策[J]. 地球与环境, 2017, 45(5): 576-586. [WEI Chaohua, WEN Haitao, LIAO Liping, et al. Failure characteristics and prevention measures of granite residual soil slope in the southeast of Guangxi province, China [J]. Earth and Environment, 2017, 45(5): 576-586]
- [4] 陈玮, 简文彬, 董岩松, 等. 软弱结构面对花岗岩残积土边坡稳定性影响[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2015, 26(1): 23-30. [CHEN Wei, JIAN Wenbing, DONG Yansong, et al. Influence of weak structural surface on stability of granite residual soil slopes [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2015,

- 26(1): 23 - 30]
- [5] 张抒,唐辉明. 非饱和和花岗岩残积土崩解机制试验研究[J]. 岩土力学, 2013, **34**(6): 1668 - 1674. [ZHANG Shu, TANG Huiming. Experimental study of disintegration mechanism for unsaturated granite residual soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, **34**(6): 1668 - 1674]
- [6] 赵晓彦,黄少强,胡厚田. 花岗岩类土质边坡特性及其组合锚固设计[M]. 北京:人民交通出版社, 2012: 12 - 14. [ZHAO Xiaoyan, HUANG Shaoqiang, HU Houtian, Properties of granite soil slope and design method of combined anchoring for its stability [M]. Beijing: China Communications Press, 2012: 12 - 14]
- [7] 赵晓彦,胡厚田. 用离心模型试验研究花岗岩残积土边坡的破坏特性[J]. 工程地质学报, 2005, **13**(3): 410 - 414. [ZHAO Xiaoyan, HU Houtian. Investigation on failure of granitic residual slope by using centrifugal model test [J]. Journal of Engineering Geology, 2005, **13**(3): 410 - 414]
- [8] 赵晓彦,胡厚田,唐茂颖. 类土质高边坡开挖效应的离心模型试验及数值模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, **25**(S2): 4046 - 4051. [ZHAO Xiaoyan, HU Houtian, TANG Maoying. Study on excavation effect of high soil-like slope by centrifugal model test and numerical simulation [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, **25**(S2): 4046 - 4051]
- [9] 胡厚田,王安福,刘涌江,等. 花岗岩类土质高边坡稳定性研究[J]. 岩土工程学报, 2009, **31**(6): 824 - 828. [HU Houtian, WANG Anfu, LIU Yongjiang, et al. Stability of granite soil high slopes [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, **31**(6): 824 - 828]
- [10] 李泳,陈晓清,胡凯衡,等. 泥石流颗粒组成的分形特征[J]. 地理学报, 2005, **60**(3): 495 - 502. [LI Yong, CHEN Xiaoping, HU Kaiheng, et al. Fractality of grain composition of debris flows [J]. Acta Geographica Sinica, 2005, **60**(3): 495 - 502]
- [11] 罗明达,杨吉华,房用,等. 沂源石灰岩山地不同植被类型土壤颗粒分形特征研究[J]. 水土保持研究, 2010, **17**(3): 17 - 21. [LUO Mingda, YANG Jihua, FANG Yong, et al. Characteristics of soil particles fractal dimension under different vegetation types in Yiyuan limestone mountain [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2010, **17**(3): 17 - 21]
- [12] 杨伟,崔鹏,庄建琦,等. 泥石流堆积物粒度分形特征及影响因素分析[J]. 水土保持通报, 2012, **32**(2): 80 - 83. [YANG Wei, CUI Peng, ZHUANG Jianqi, et al. Particle-size's fractal characteristics of debris-flow deposits and associated influencing factors [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2012, **32**(2): 80 - 83]
- [13] 黄祺,陈宁生,朱云华,等. 泥石流源区砾石土的粒度分形特征[J]. 山地学报, 2012, **30**(5): 578 - 584. [HUANG Qi, CHEN Ningsheng, ZHU Yunhua, et al. Particle size fractal characteristics of the gravel soil in original area of debris flow valleys [J]. Mountain Research, 2012, **30**(5): 578 - 584]
- [14] 倪化勇,刘希林. 泥石流粒度分维值的初步研究[J]. 水土保持研究, 2006, **13**(1): 89 - 91. [NI Huayong, LIU Xilin. A preliminary study on debris flow grain-size fractal dimension [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2006, **13**(1): 89 - 91]
- [15] 刘超,苏立君,刘文静. 堆积层滑坡土石混合物微观结构特征研究综述[J]. 山地学报, 2015, **33**(3): 348 - 355. [LIU Chao, SU Lijun, LIU Wenjing. Review of meso-structure characteristic of soil-rock mixture in accumulation landslides [J]. Mountain Research, 2015, **33**(3): 348 - 355]
- [16] 董佳琪,王清,张旭东,等. 泥石流堆积物粒度分布特征影响因素分析及分形维数预测[J]. 工程地质学报, 2015, **23**(3): 462 - 468. [DONG Jiaqi, WANG Qing, ZHANG Xudong, et al. Influencing factors analyzing of grain size distribution characteristics of debris flow deposition and fractal dimension prediction [J]. Journal of Engineering Geology, 2015, **23**(3): 462 - 468]
- [17] Mandelbrot, B B. The fractal Geometry of Nature [M]. New York: WH Freeman, 1982: 77 - 86.
- [18] 陈颢,陈凌. 分形几何学[M]. 北京:地震出版社, 1998: 5 - 16. [CHEN Yong, CHEN Ling, Fractal geometry [M]. Beijing: Seismological Press, 1998: 5 - 16]
- [19] 陈缪芬,高庄平,朱俊高,等. 粗粒土级配及颗粒破碎分形特性[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015, **46**(9): 3446 - 3453. [CHEN Liufen, GAO Zhuangping, ZHU Jungao, et al. Gradation of coarse grained soil and fractal geometry character of particle breakage [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2015, **46**(9): 3446 - 3453]
- [20] 贺拿,陈宁生,朱云华,等. 泥石流源区砾石土分形特征及其与渗透系数关系试验研究[J]. 岩土力学, 2014, **35**(9): 2543 - 2548. [HE Na, CHEN Ningsheng, ZHU Yunhua, et al. Experiment study of fractal feature and relationship between fractal dimension and permeability coefficient of gravelly soil in debris flow source area [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, **35**(9): 2543 - 2548]
- [21] 吕学军,余猛. 泥石流堆积物粒度分维的讨论[J]. 水土保持研究, 2007, **14**(4): 105 - 108. [LV Xuejun, SHE Meng. Discussion on grain-size fractal dimension of debris flow accumulations [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2007, **14**(4): 105 - 108]
- [22] 谢贤健,韦方强. 泥石流频发区不同盖度草地土壤颗粒的分形特征[J]. 水土保持学报, 2011, **25**(4): 202 - 206. [XIE Xianjian, WEI Fangqiang. Characteristics of soil particle fractal dimension under different coverage grassland of the area with high-frequency debris flow [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2011, **25**(4): 202 - 206]
- [23] 杜俊,侯克鹏,杨帆. 分形理论在排土场散体力学性质研究中的应用[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版), 2013, **38**(3): 30 - 35. [DU Jun, HOU Kepeng, YANG Fan. Application of fractal geometry to mechanical properties study of granular material [J]. Journal of Kunming University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2013, **38**(3): 30 - 35]

- [24] 魏丽, 胡凯衡. 蒋家沟阵性泥石流输沙规律研究[J]. 自然灾害学报, 2014, **23**(2): 53-60. [WEI Li, HU Kaiheng. Study on sediment transporting characteristics of intermittent debris flows in Jiangjia Ravine [J]. Journal of Natural Disasters, 2014, **23**(2): 53-60]
- [25] 邱海军, 崔鹏, 王彦民, 等. 基于关联维数的黄土滑坡空间分布结构及其成因分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, **34**(3): 546-555. [QIU Haijun, CUI Peng, WANG Yanmin, et al. Spatial distribution structure of loess landslides and cause analysis based on correlated fractal dimension [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, **34**(3): 546-555]
- [26] 杨军, 方世跃, 王得楷, 等. 泥石流沟分形分维规律研究[J]. 自然灾害学报, 2014, **23**(1): 108-111. [YANG Jun, FANG Shiyue, WANG Dekai, et al. Study on fractal regularity of debris flow gullies [J]. Journal of Natural Disasters, 2014, **23**(1): 108-111]
- [27] 管孝艳, 杨培岭, 吕焯. 基于多重分形理论的农田土壤特性空间变异性分析[J]. 应用基础与工程科学学报, 2011, **19**(5): 712-720. [GUAN Xiaoyan, YANG Peiling, LV Ye. Analysis on spatial variability of soil properties based on multifractal theory [J]. Journal of basic science and Engineering, 2011, **19**(5): 712-720]
- [28] 高冰, 周健, 张姣. 泥石流启动过程中水土作用机制的宏观细观分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, **30**(12): 2567-2573. [GAO Bing, ZHOU Jian, ZHANG Jiao. Macro-meso analysis of water-soil interaction on mechanism of debris flow starting process [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, **30**(12): 2567-2573]
- [29] 庄建琦, 崔鹏, 胡凯衡, 等. 细颗粒迁移在泥石流形成过程中的作用[J]. 山地学报, 2015, **33**(6): 713-720. [ZHUANG Jianqi, CUI Peng, HU Kaiheng, et al. Fine particle size moving and its effective on debris flow initiation [J]. Mountain Research, 2015, **33**(6): 713-720]

The Relationship between Particle Fractal and Physical Parameters of Granite Residual Soil in Rong County, Southeastern Guangxi Province, China

LIAO Liping^{1, 2, 3}, WEN Haitao⁴, ZHAO Yanlin¹, YANG Yunchuan^{1, 2, 3*}, CHEN Lihua¹

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning 530004, China;

2. Guangxi Key Laboratory of Disaster Prevention and Engineering Safety, Guangxi University, Nanning 530004, China;

3. Key Laboratory of Disaster Prevention and Structural Safety of Ministry of Education, Guangxi University, Nanning 530004, China;

4. Guangxi Zhuang Autonomous Region Geological Environmental Monitoring Station, Guangxi Guilin 541000, China)

Abstract: Landslides of granite residual soil in Rong county, southeastern Guangxi, occur frequently. In order to clarify the grain size of granite residual soil and reveal the landslide formation mechanism, in this paper, based on soil tests and detailed surveyed data, the fractal theory was used to study on the correlation between particle fractals and physical parameters of four depths (0 ~ 30 cm、30 ~ 50 cm、50 ~ 70 cm、sliding surface with a depth of 1 ~ 3 m). Results show that: (1) granite residual soil is mainly composed of fine gravel (with a diameter of 2 ~ 5 mm) and sand (with a diameter of 0.075 ~ 2 mm). Besides, one fractal feature exists in a non-scale interval between 0.075 and 5. (2) the average fractal dimension of granite residual soil is as follows: D_{50-70} (2.7244) > $D_{sliding\ surface}$ (2.6910) > D_{0-30} (2.6893) > D_{30-50} (2.6480). (3) a significant positive correlation is between fractal dimension and silt content, and correlation coefficient increases with soil depth. In addition, a negative correlation is between fractal dimension and fine gravel and coarse sand. In other words, larger fractal dimension corresponds to higher content of silt, lower content of fine gravel and coarse sand. (4) D_{30-50} and $D_{sliding\ surface}$ has a significant negative correlation with permeability coefficient and dry density.

Key words: Rong county; Granite residual soil; Particle fractal characteristics; Physical parameter