

# 不同颗粒成分对花岗岩残积土路堤边坡稳定性的影响<sup>\*</sup>

周毅<sup>1</sup>, 吴梦丽<sup>2</sup>, 龙志东<sup>2</sup>

(1.广东省长大公路工程有限公司, 广东 广州 510620; 2.长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114)

**摘要:** 不同颗粒成分土体强度的变化在花岗岩残积土边坡稳定性分析中十分重要。文中通过对不同颗粒成分花岗岩残积土进行渗透试验、土水特性试验、直剪试验, 得到其抗剪强度随颗粒成分的变化规律; 通过 Geostudio 中的 SEEP 与 SLOP 模块进行有限元数值模拟, 分析不同颗粒成分花岗岩残积土边坡的稳定性。结果表明, 颗粒成分的差异会直接影响土体的抗剪强度, 在雨水冲刷条件下, 花岗岩残积土中粗颗粒含量越少, 保水性能越好, 渗透系数越小, 抗剪强度越高, 花岗岩残积土路堤边坡稳定系数越大, 稳定性越好; 若发生失稳, 也主要表现为浅层坡面失稳。

**关键词:** 公路; 路堤边坡; 花岗岩残积土; 颗粒成分; 抗剪强度; 稳定性

中图分类号: U416.1

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2019)04-0062-03

花岗岩残积土是中国华南地区重要的路堤填筑材料。复杂的气候条件对花岗岩的风化程度影响很大, 使其具有扰动性、软化性、崩解性、不均匀性和各向异性等性质。在花岗岩残积土分布地区, 常因降雨产生滑坡。因此, 研究影响花岗岩残积土边坡稳定性的因素, 掌握其影响规律及内在机理, 是保持花岗岩残积土边坡稳定的关键。邱路阳等认为高填方路堤边坡的破坏形式主要取决于边坡的岩土矿物成分及其特征, 包括岩土物质组成、物理力学性质及结构构造等; 黄汉芳等提出边坡稳定性取决于残积土结构面的强度, 边坡失稳主要取决于抗剪强度; 阙云等研究得出黏粒含量对花岗岩残积土粘聚力的影响显著; 吴迪等通过环剪试验分析花岗岩残积土抗剪强度在较大剪切位移作用下的变化规律, 认为花岗岩残积土的矿物组成成分直接影响土体的抗剪强度; 龙志东等通过直剪试验分析得出花岗岩残积土的颗粒成分对土体抗剪强度指标有显著影响。但这些研究都未阐明不同颗粒成分对花岗岩残积土边坡抗剪强度影响的内在机理。该文在分析不同颗粒成分花岗岩残积土特性的基础上, 运用 Geostudio 中的 SEEP 与 SLOP 模块分析不同颗粒成分花岗岩残积土边坡的稳定性。

## 1 花岗岩残积土的物理性质

花岗岩残积土分布广泛, 特性不一, 具有孔隙率

小、吸水率较小、膨胀系数不一、遇水易散、结构松散、保水性差、水稳性较差等特点。为研究花岗岩残积土的物理性质, 依托广佛肇(广州—佛山—肇庆)高速公路项目, 从现场取样进行液塑限试验、土颗粒筛分试验等, 分析花岗岩残积土的基本物理性质与组成, 结果见表 1。

表 1 花岗岩残积土的物理性质与组成

项目		试验值
取样深度/m		0~3
天然含水率/%		23.5
界限含水率	液限/%	42.0
	塑限/%	22.9
	液性指数	0.08
	塑性指数	19.1
颗粒组成/%	>2 mm	28.8
	>0.5 mm	40.3
	0.075~0.5 mm	5.28
	<0.075 mm	54.42
物质组成/%	石英	45
	叶蛇纹石	33
	白云母	22

由表 1 可知: 花岗岩残积土主要由石英、叶蛇纹石、白云母等组成; 其液塑限较低, 液限低于 50%, 属于低液限土; 总质量中 54.42% 的颗粒粒径小于

<sup>\*</sup> 基金项目: 广东省交通运输厅科技计划项目(2013-00-002)

0.075 mm,表明土壤中的细颗粒较多;28.8%的颗粒粒径大于 2 mm,表明土壤中存在一定量的粗颗粒。该项目花岗岩残积土是一种低液限砂性土。

2 不同颗粒成分花岗岩残积土的力学试验

边坡的稳定性与土体抗剪强度有关,而土体的抗剪强度与基质吸力密切相关,花岗岩残积土是一种含砾类低液限黏土。对于非饱和土,基质吸力大小对其力学性质的分析非常关键。同时降雨对边坡稳定性的影响也不容忽视,不同颗粒成分花岗岩残积土的渗透系数及抗剪强度有所差别。为得到不同颗粒成分花岗岩残积土样的渗透系数、土水特性曲线及抗剪强度指标,通过室内筛分试验,将土样分为颗粒粒径 2~0.075 mm 的粗粒组、颗粒成分保持不变的重塑组、颗粒粒径<0.075 mm 的细粒组 3 组试样,分别进行渗透试验、土水特性试验、直剪试验。

2.1 渗透试验

渗透是水在土体中的运动现象,它与土体的内部结构、孔隙分布状况、介质等密切相关。根据土工试验规范,保持试样干密度为 1.58 g/cm<sup>3</sup>,采用常水头渗透试验测试土体的渗透系数。由于水中气体对渗透系数有显著影响,水和气体的分离会堵塞土壤中的孔隙,从而降低土壤的渗透系数,故试验采用无气体的水或天然水。3 组不同颗粒成分花岗岩残积土的饱和渗透系数见表 2。

表 2 不同颗粒成分花岗岩残积土的平均渗透系数

颗粒组分	平均渗透系数/(m·s <sup>-1</sup> )
粗粒组	$3.70 \times 10^{-3}$
重塑组	$2.03 \times 10^{-6}$
细粒组	$4.11 \times 10^{-8}$

由表 2 可知:不同颗粒成分花岗岩残积土的渗透系数从大到小依次为粗粒组、重塑组、细粒组。在一定干密度条件下,不同颗粒粒组的孔隙体积相同。平均粒径增大使土壤颗粒间的孔隙增大,因总孔隙体积相同,平均孔径增大,相应孔隙数量减少,流体的横截面增大;随着孔隙数量的减少,流体的流动距离缩短,单位时间的渗流速率增加,渗透系数增大。

2.2 土水特性试验

为获得不同颗粒成分花岗岩残积土的基质吸力,进行室内土水特性试验。试验采用美国 Soil-moisture 公司开发的压力板仪,其主要由加压系统、压力室和排水系统组成。压力室中的土壤样品通过

陶土板和板下的自由水连接,当压力室中的压力增加时,板下的自由水和水势低于陶土板上的总土壤水势,土壤样品开始排水,直到陶土板上的土壤水势和陶土板下自由水的水势相等为止,达到平衡状态。通过有限元拟合试验数据,得到体积含水率与基质吸力之间的关系,从而得到不同颗粒成分下脱湿和增湿阶段的土-水特征曲线(见图 1)。

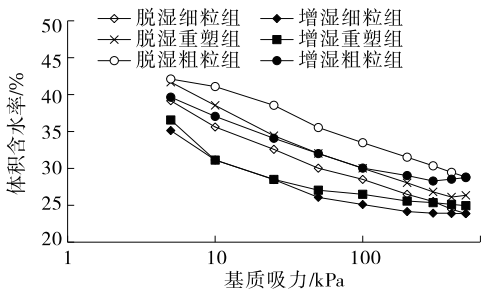


图 1 不同颗粒成分花岗岩残积土的土-水特性曲线

由图 1 可知:1) 在脱湿过程中,随着基质吸力的增加,花岗岩残积土的体积含水率变小,在接近残余含水率时曲线走势趋于平缓。细粒组土样的土-水特征曲线在重塑组和粗粒组曲线的下方,在相同基质吸力条件下,细粒组土样的脱湿速率变化较快。主要是由于细粒组颗粒内部结构之间的孔隙多,水流路径较多,孔隙结构影响土水作用的面积,随着基质吸力增加,土壤样品的排水速率加快,因而粒径越小的土样其脱湿速率变化越快。2) 在增湿过程中,随着体积含水率的增加,基质吸力逐渐变小,曲线变化趋势由缓升变为陡升,粒径大的颗粒上升速率小于粒径小的颗粒上升速率,且粒径较大土样的曲线始终保持在粒径小的曲线上方。主要是由于粒径越大,孔隙比越小,土样内部水流通道路径越少,土样即将或达到饱和的变化速率越慢,随着粒径递增,土体中的增湿速率逐渐减小。3) 同一粒组在相同基质吸力下,脱湿阶段的体积含水率大于增湿阶段的体积含水率。处于脱湿过程中的土样需在更高的体积含水量状态下才能达到与吸湿过程相同的基质吸力,即在相同体积含水率下,脱湿阶段的基质吸力大于增湿阶段。4) 花岗岩残积土的土-水特性曲线在脱湿与增湿阶段都有明显的滞回圈。滞回圈是土-水特性曲线的典型特征,它由多种效应叠加引起,土体孔隙大小不一,具有不均匀性,使土体脱水与吸水的难易程度不同。在脱湿过程中,随着基质吸力的增加,受气压的影响,土体中大孔隙的水分首先排出;而在增湿过程中,土体的小孔隙优先吸水。这是

同一基质吸力下增湿过程中土体的含水量小于脱湿过程的产生原因,也是曲线滞回圈产生的主要原因。

### 2.3 直剪试验

为测定花岗岩残积土的抗剪强度指标,采用 ZJ-2 应变控制的四联直剪仪进行花岗岩残积土直剪试验。根据土工试验规范,将 3 组试样配制一定的含水率并进行静压制样,然后将直剪盒内的土样进行真空饱和,再对试样进行不同垂直荷载下的固结试验,试样固结稳定后以 0.1 mm/min 的剪切速率进行直剪试验。试验结果见表 3。

表 3 不同颗粒成分花岗岩残积土的强度指标值  
(初始干密度  $1.58 \text{ g/cm}^3$ )

颗粒组分	强度指标	
	内摩擦角/(°)	粘聚力/kPa
粗粒组	23.8	4.6
重塑组	22.5	11.2
细粒组	21.3	16.5

由表 3 可知:不同颗粒成分对花岗岩残积土体的抗剪强度有显著影响,随着粗颗粒成分含量的增加,花岗岩残积土的粘聚力逐渐减小,内摩擦角逐渐增大。

### 2.4 颗粒成分对边坡稳定性的影响

花岗岩残积土的力学参数指标采用上述试验得到的土-水特征曲线、有效抗剪强度指标。以广佛肇高速公路项目花岗岩残积土路堤为例,选取路堤的一半作为研究对象,干密度取  $1.58 \text{ g/cm}^3$ ,分两级边坡,坡高 8 m,坡比为 1:1.5。稳态的边界条件:左边初始水头 1 m,右边为 0.5 m。根据项目所在地区历年水文勘测资料,考虑到该地区在夏季经常发生大暴雨情况,日降雨量取  $199 \text{ mm/d}$  ( $2.31 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ ),运用 Geostudio 软件中的 SEEP 模块与 SLOPE 模块耦合进行模拟分析。结果见图 2,边坡稳定性系数见表 4。

由图 2 和表 4 可知:边坡稳定性系数由大到小依次为细粒组、重塑组、粗粒组。细粒组边坡在发生破坏时主要表现为坡面冲刷失稳;而粗粒组边坡失稳时不仅表面发生破坏,其深层土体也受到影响,表现为不稳定状态。

在未发生降雨时,边坡土体处于非饱和状态,土体内部存在孔隙气压力,其渗透性较低。对于粗粒组边坡,由于渗透系数相对较大,发生降雨时,雨水通过坡面及坡顶进入土体内部,入渗速度也快。随

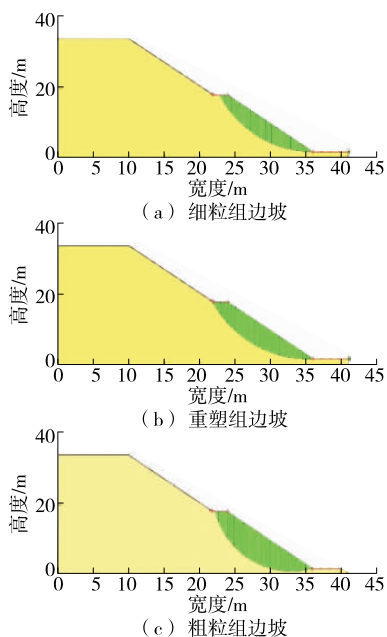


图 2 不同颗粒成分花岗岩残积土边坡稳定性数值模拟结果

表 4 不同颗粒成分花岗岩残积土边坡的稳定性系数

颗粒组分	稳定性系数
细粒组	1.645
重塑组	1.415
粗粒组	1.093

着降雨的入渗,土体内部形成竖向渗流,改变坡面及坡体内部的渗流条件,使坡体内部产生渗流力。边坡表层的孔隙水压力由负值逐渐增大,甚至在饱和区变为正值;体积含水率也逐渐增加,达到土体饱和时的饱和含水率;基质吸力逐渐减小甚至为零,在一定程度上将降低了边坡原有的抗剪强度。降雨的入渗也使地下水位上升,边坡粗粒土的重度增大,下滑力增大。这些都导致粗粒组边坡的稳定性较差。

### 3 结论

(1) 不同颗粒成分对花岗岩残积土的抗剪强度影响很大,粗颗粒含量越少,其渗透系数越小,抗剪强度越大。

(2) 受颗粒成分的影响,广佛肇高速公路地区边坡的稳定性系数为 1.093~1.645。

(3) 粗颗粒成分含量越少,边坡稳定性越高。可据此选择花岗岩残积土工程中边坡材料。

### 参考文献:

- [1] 胡兵.揭阳地区花岗岩残积土工程性质分析[J].勘察科  
(下转第 69 页)

表 6 各处理方式下矽的强度增长率

矽类别	抗压强度增长率/%				劈裂抗拉强度增长率/%			
	7 d	28 d	60 d	平均	7 d	28 d	60 d	平均
I	37	18	12	22	16	8	5	10
II	10	13	18	14	4	11	7	7
III	-23	-18	-17	-19	-23	-19	-15	-19

然骨料矽相比,其强度降低 20% 以上。

(2) 水灰比对砖矽再生矽的强度有很大影响,水灰比越低,矽强度越高,水灰比低于 0.48 时强度下降较大。

(3) 再生粗骨料中砖含量对矽强度有影响,砖含量为 20% 时抗压强度和劈裂强度都获得最大值,大于 20% 时强度降低。建议将砖含量控制在 20% 以内。

(4) 采用水玻璃和盐酸强化后,矽强度显著提高,抗压强度分别提升 22%、14%。水玻璃可较好地提升矽前期强度,盐酸则对后期强度增长有明显作用。采用有机硅树脂强化再生粗集料,虽会提高骨料的性能,但会导致再生矽强度降低,平均降低幅度达 19%。

#### 参考文献:

- [1] 李浩,翟宝辉.中国建筑垃圾资源化产业发展研究[J].城市发展研究,2015,22(3).
- [2] 肖建庄,李佳彬,兰阳.再生混凝土技术研究最新进展与评述[J].混凝土,2003(10).
- [3] 肖建庄,李佳彬,孙振平,等.再生混凝土的抗压强度研究[J].同济大学学报:自然科学版,2004,32(12).

- [4] 李佳彬,肖建庄,孙振平.再生粗骨料特性及其对再生混凝土性能的影响[J].建筑材料学报,2004,7(4).
- [5] 索伦,彭鹏,赵燕茹.再生粗集料强化试验研究[J].材料导报,2015,29(增刊 1).
- [6] 孙跃东,王涛.再生骨料强化对再生混凝土基本力学性能的影响[J].四川建筑科学研究,2010,36(4).
- [7] 陈萌,马智永,苗丽.碎粘土砖粗骨料再生混凝土强度试验研究[J].混凝土与水泥制品,2015(5).
- [8] 谢玲君.废弃烧结砖瓦再生骨料混凝土配制技术与性能研究[D].泰安:山东农业大学,2012.
- [9] 张亚梅,秦鸿根,孙伟,等.再生混凝土配合比设计初探[J].混凝土与水泥制品,2002(1).
- [10] 张学兵.再生混凝土改性及配合比设计研究[D].长沙:湖南大学,2015.
- [11] 王显利,李奇超,常广利.复掺废砖再生混凝土的抗压强度[J].北华大学学报:自然科学版,2017,18(4).
- [12] 徐原威.建筑垃圾再生混凝土的力学性能试验及在公路面层中的应用研究[D].南昌:南昌大学,2016.
- [13] 肖开涛.再生混凝土的性能及其改性研究[D].武汉:武汉理工大学,2004.
- [14] 张伟.再生混凝土性能研究[D].昆明:昆明理工大学,2008.

收稿日期:2019-01-06

(上接第 64 页)

- [1] 学技术,2017(增刊).
- [2] 舒彪.花岗岩残积土路堤边坡水毁病害成因分析及处治措施[J].城市道桥与防洪,2017(5).
- [3] 邱路阳,刘毓毓,李大勇.高填方残积土路堤降雨滑塌机理与治理对策[J].岩土力学,2007,28(10).
- [4] 黄汉芳.福建泉州沿海地区花岗岩残积土特性及边坡稳定性分析[J].中国西部科技,2008,7(33).
- [5] 阙云,姚晓琴,陈祖鑫,等.福建非饱和和花岗岩残积土强度特性的试验研究[J].公路,2012(6).
- [6] 吴迪,简文彬,徐超.残积土抗剪强度的环剪试验研究[J].岩土力学,2011,32(7).
- [7] 龙志东,王中文,史斌,等.花岗岩残积土抗剪强度及其影响因素试验[J].长沙理工大学学报:自然科学版,2016,13(3).

- [8] 陈晓平,周秋娟,蔡晓英.高液限花岗岩残积土的物理特性和剪切特性[J].岩土工程学报,2011,33(6).
- [9] 赵建军,王思敬,尚彦军,等.全风化花岗岩抗剪强度影响因素分析[J].岩土力学,2005,26(4).
- [10] 文宝萍,胡艳青.颗粒级配在非饱和粘性土基质吸力的影响规律[J].水文地质工程地质,2008,35(6).
- [11] 丁少林,左昌群,刘代国,等.非饱和残积土土一水特性研究及基质吸力估算[J].长江科学院院报,2016,33(3).
- [12] 邓喜,何忠明,付宏渊,等.降雨入渗对花岗岩残积土高路堤边坡稳定性的影响[J].矿冶工程,2016,36(4).
- [13] 王成皿,兰天,刘龙武.深层水毁防治技术在花岗岩残积土路基边坡中的应用研究[J].公路与汽运,2017(2).

收稿日期:2018-07-24