

雷州半岛玄武岩残积土的物质成分与结构特征*

张先伟^{①②} 李晶晶^① 李峻^① 张静^③

(^①中国科学院武汉岩土力学研究所岩土力学与工程国家重点实验室 武汉 430071)

(^②同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室 上海 200092)

(^③辽宁省地质环境监测总站 沈阳 110032)

摘要 雷州半岛玄武岩残积土属于区域性特殊土,具有高液限、大孔隙比的较差的物理特性和高强度的较优的力学特性的异常组合,同时具有强收缩性、遇水湿化、易崩解的特殊性质。为探寻玄武岩残积土特殊的工程地质特性的机理,对其矿物成分、化学成分、结构形态、孔隙分布进行研究。结果表明,雷州半岛玄武岩残积土发育过程经历明显的富铝化、铁富集和盐淋失过程,黏土矿物以高岭石、三水铝石和伊利石为主,富含游离氧化铁、铝成分;微观结构类型为凝块结构和絮凝结构,游离氧化铁作为胶结物质以“包膜”形式包裹颗粒形成团聚体,增强了土的结构强度;孔隙以溶蚀孔隙以及团粒和絮凝体内微孔为主,微孔具有较大的比表面积和吸附能,吸水会产生较大的表面张力,引发软化、崩解现象。由于雷州半岛玄武岩残积土具有对水敏感、抗水性差特点,施工中应重点关注降雨引发的工程灾害。

关键词 玄武岩残积土 雷州半岛 物质成分 结构 氧化铁

中图分类号: TU411 文献标识码: A

STRUCTURE AND COMPOSITION OF RESIDUAL SOIL FROM DECOMPOSED BASALT AT LEIZHOU PENINSULA

ZHANG Xianwei^{①②} LI Jingjing^① LI Jun^① ZHANG Jing^③

(^①State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071)

(^②Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092)

(^③Liaoning Geological Environmental, Shenyang 110032)

Abstract Residual soil from decomposed basalt at Leizhou Peninsula is special regional soil. It has poor physical properties of high liquid limit and large void ratio, good mechanical properties of high strength, and extraordinary properties of strong contractility, humidification and disintegration. This paper attempts to examine the mechanism of the special engineering geological characteristics of the basalt residual soil. It studies the mineral composition, chemical composition, structure, and pore distribution from laboratory tests. Results show that distinct aluminum, iron accumulation, and salt leaching processes occur during the development process of the basalt residual soil. Clay minerals are mainly composed of kaolinite, gibbsite and illite. Furthermore, they are rich in free iron oxide and free aluminum oxide. Microstructure is mainly clot and flocculation structure. The free iron oxide acts as

* 收稿日期: 2014 - 03 - 28; 收到修改稿日期: 2014 - 06 - 29.

基金项目: 湖北省自然科学基金(2011CDB406)和岩土及地下工程教育部重点实验室(同济大学)开放课题(KLE-TJGE-B1103)资助。

第一作者简介: 张先伟(1982 -),男,博士,助理研究员,主要从事特殊土的力学特性研究。Email: xwzhang@whrsm.ac.cn

coating that clads particles to form aggregate, which enhances structural strength of soil. Pores mainly consist of denudation pores and micropores in the aggregate and flocculation, and with larger specific surface area and adsorption energy. Large surface tension occurs after immersion which leads to softening and disintegration. Therefore, close attention should be paid to engineering disasters caused by rainfall due to the water sensitive and poor water resistance of the basalt residual soil.

Key words Basalt residual soil, Leizhou peninsula, Composition, Structure, Iron oxide

0 引言

我国的雷州半岛及海南岛北部广泛分布着第四纪喷发的玄武岩,雷州半岛玄武岩发育在喜马拉雅构造运动雷琼断陷中,形成时期可划分为早、晚两期,早期为中更新世(石峁岭组 Q_{2s}),晚期为晚更新世(湖光岩组 Q_{2h})^[1]。该区气候属炎热多雨,干湿季节变化明显的热带季风气候,这为玄武岩快速风化分解及红土化,进而形成残积红土提供了有利条件。

玄武岩残积土是指由玄武岩完全风化后残留在原地或经过微搬运而形成的土。雷州半岛玄武岩残积土地貌类型以台地状分布为主,地表残积土厚度一般为 5~15m。玄武岩残积土是当地大量建(构)筑物的浅基础持力层,天然状态下表现为高液限、大孔隙比的较差的物理特性和高强度的较优的力学特性的异常组合,同时具有强收缩性、干硬湿软、遇水湿化、易崩解特性^[2,3]。该土的基本性质与一般流水沉积的黏性土有明显差别,一些特征指标甚至超出当前一些规范、规程对一般黏性土界定的取值范围。如对此类残积土的特殊性质阙疑或采取工程措施不合理,则有可能对土的强度与变形特性做出错误的判断和给设计基础方案的实施造成阻碍。此外,残积土的风化程度、厚度与性质与气候、地形、新构造运动与水文地质条件等因素有关,这也造成雷州半岛玄武岩残积土土性不同于其他地区玄武岩残积土^[4,5]。由此看来,雷州半岛玄武岩残积土具有明显的区域工程地质特性,勘察工作中宜按特殊土类评价,但以往对其研究并不多见,特别是缺乏其特殊土性的本质机理的认识,这也造成当地工程的勘察设计几乎无章可循。除原位载荷试验以外,以现行规范允许采用的物理力学指标查算残积土的承载力存在较大困难;以理论公式计算承载力又因土的力学指标离散度大而结果不理想。

与天然沉积形成的黏性土不同,残积性黏性土的工程地质特性取决于母岩的晶体构造和风化淋溶

过程中解体的程度,即决定于母岩晶体结构中的化学键在风化淋溶过程中残留多少以及物质成分的风化与淋失程度,也就是说残积土的工程地质特性受控于土的物质成分与结构特性,这才是造成玄武岩残积土特殊工程地质特性的根本原因。鉴于此,利用先进的微观测试技术与土化学分析方法,对雷州半岛某区的玄武岩残积土的矿物成分、化学成分、结构形态、孔隙分布特征进行深入研究,关联它们与土的物理力学特性,阐述玄武岩残积土具有特殊工程地质特性的本质。

1 试样与试验方法

试样取自雷州半岛西南部的雷州市龙门林场的第四纪全新统风化残积土,取样深度为 1.5~2.5m,采用人工挖掘方法取样,为保证天然含水率与原始结构不被破坏,土样运至试验后立即进行相关试验。

土的化学成分测试方法依据文献[6,7]。用 FG2-FiveGo™ pH 计测定土的 pH 值;用乙二醇乙醚吸附法(EGME 法)测定土的总比表面积;用 NOVA1000e 孔径分布测量仪测定土的外表面积;用 DTG-60 热重-差热分析仪进行差热试验;用 D8 Advance X 射线衍射仪进行土中矿物物相分析;用 Quanta 250 扫描电子显微镜进行微观结构拍照,并利用此仪器进行能谱测试(能谱测试时,进行喷金镀膜);用 Poremaster 33 高压孔隙结构仪进行压汞试验,获得孔径分布曲线。其中,扫描电镜与压汞试验的试样采用真空冷冻升华干燥法制样。

2 玄武岩残积土的物理力学特性

雷州半岛玄武岩残积土的颗分曲线(图 1),加入分散剂后,粒径 $D < 0.002\text{mm}$ 的黏粒含量由 42.1% 升至 56.5%,说明该土中可能存在稳定性较差“假粉粒”;去除游离氧化铁后,黏粒含量升高至 80.5%,反映出游离氧化土对该土的团聚体具有较强的黏聚作用。

表 1 玄武岩残积土的物理性质指标统计表

Table 1 Indexes of physical properties of basalt residual soils

取值	天然含水率 w / (%)	天然密度 ρ / $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	干密度 ρ_d / $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	比重 G_s	孔隙比 e	液限 W_L / (%)	塑限 W_p / (%)	液性指数 I_L	塑性指数 I_p	饱和度 S_r / (%)
最小值	37.00	1.62	1.17	2.78	1.31	52.00	28.00	0.07	21.00	76.32
最大值	42.10	1.66	1.21	2.84	1.43	64.00	37.00	0.42	31.60	79.43
平均值	38.09	1.64	1.18	2.80	1.37	58.01	31.10	0.27	26.91	78.48

取值	渗透系数 $K \times 10^{-6} / \text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$		自由膨胀率 δ_{ef} / (%)	50kPa 膨胀率 δ_{50} / (%)	原状土(天然含水率)			扰动土(含水率等于液限)		
	室内试验 (20℃)	现场注水			线缩率 δ_s / (%)	体缩率 δ_v / (%)	收缩系数 c_{sl}	线缩率 δ_s / (%)	体缩率 δ_v / (%)	收缩系数 c_{sl}
最小值	2.30	45.00	30.60		5.20	9.60	5.20	14.36	26.00	0.60
最大值	9.00	90.00	41.00	接近 0	6.32	10.8	6.32	16.35	31.00	0.71
平均值	5.83	77.70	35.47		5.71	10.06	5.71	15.36	27.67	0.66

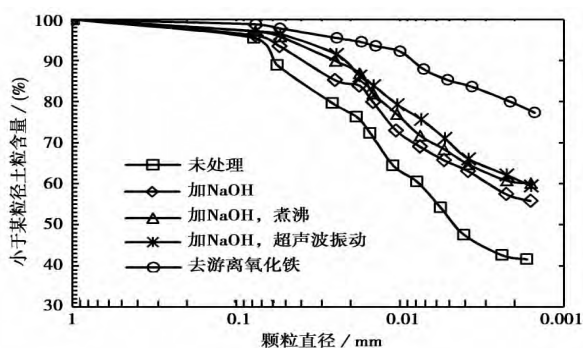


图 1 玄武岩残积土的颗分曲线

Fig. 1 Grain-size distributions of basalt residual soils

雷州半岛玄武岩残积土颜色为棕红色至暗棕红色,对应门塞尔土壤比色卡为 2.5YR 4/8 ~ 2.5YR 8/6,其物理指标(表 1)。该土的天然含水率(现场环刀测得)普遍偏高,天然密度较小,孔隙比较大,但天然状态下属于硬塑—可塑状态。塑性指数 I_p 变化范围较大,按 I_p 分类属黏土;液限范围为 52% ~ 64%,属高液限黏土。根据室内与现场试验,该土在天然状态下具有弱透水性。玄武岩残积土的膨胀性并不高,在有荷(50kPa)条件下,基本无膨胀性,但当含水率增至液限时,该土的收缩性凸显,表现为线缩率与体缩率明显增大,表明该土具有较强的收缩性。

表 2 玄武岩残积土的力学性质指标

Table 2 Mechanical average indexes of basalt residual soils

标贯击数 / $N_{63.5}$	压缩系数 $a_{1-2} / \text{MPa}^{-1}$	压缩模量 E_s / MPa	无侧限抗压强度 q_u / kPa		三轴固结不排水(CU) 剪切强度							
			天然状态	饱和状态	天然状态				饱和状态			
					c_{cu} / kPa	$\varphi_{cu} / (^\circ)$	c'_{cu} / kPa	$\varphi'_{cu} / (^\circ)$	c_{cu} / kPa	$\varphi_{cu} / (^\circ)$	c'_{cu} / kPa	$\varphi'_{cu} / (^\circ)$
平均 14.3 击	0.39	6.06	87.69	68.00	43.3	21.55	58.30	21.25	32.50	20.66	47.70	20.67

雷州半岛玄武岩残积土的力学指标(表 2)。该土的压缩系数 $a_{1-2} < 0.5 \text{MPa}^{-1}$,属中等压缩性土。抗剪强度指标具有与黏性土相似的高黏聚力和与粉质土相似的高内摩擦角,说明该土在具有较大孔隙比的疏松状态下,土颗粒间的联结力较强,仍具有较优的力学特性。然而,该土具有遇水湿化,强度迅速降低的现象,表现为,饱和的原状土 q_u 、 c_{cu} 、 φ_{cu} 较天然状态下土的相应值减少了 22.5%、24.9%、4.1%。比较饱和前后的玄武岩残积土的强度指标变化,黏聚力变化幅度明显大于内摩擦角,反映了遇水土性劣化的主因应是颗粒的凝聚力减弱引起的。

3 玄武岩残积土的物质成分

3.1 矿物成分

雷州半岛玄武岩残积土的 X 射线衍射结果(表 3) 相应图谱(图 2)。该土中的黏土矿物以高岭石为主,其次为三水铝石、伊利石,黏土矿物含量高达 75.9% 以上,本区残积土还含有不到 5% 的蒙脱石和含量相对较高的赤铁矿。差热试验中也表明玄武岩残积土矿物中主要以高岭石为主(图 3),在 970℃ 时由于脱羟后的矿物晶格被破坏,形成新相引起的能量释放,产生快速的放热峰。在 502.5℃ 时,迅速析出结构水,差热曲线上有一个强烈的吸热谷,

这可能是土中含有云母类矿物引起^[8]。

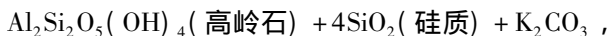
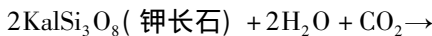
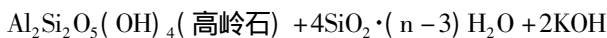
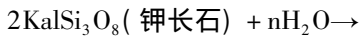
表3 矿物物相分析结果(全土)

Table 3 Results of analysis of material phase(total soil)

埋深/m	矿物相对含量/(%)					
	Qtz	Ill	Mnt	Kln	Gbs	Hem
1.5~2.0	15.53	12.33	4.07	49.53	14.33	6.96
2.0~2.5	17.59	10.72	4.83	46.79	10.63	6.71

Qtz: 石英; Ill: 伊利石; Mnt: 蒙脱石; Kln: 高岭石; Gbs: 三水铝石; Hem: 赤铁矿

玄武岩的风化程度越高,残积土中的高岭石含量越高。高岭石的结构晶架都由一个硅氧片和一个水铝片重叠而成,属1:1型矿物,吸水性强,遇水后易膨胀和软化,具有可塑性和强压缩性。有研究表明^[9],高岭石类矿物系玄武岩残积土的典型矿物,一般是由铁镁硅酸盐矿物或长石在风化与淋溶条件下的产物。例如钾长石在水溶液和氧气与二氧化碳等作用下发生的水解与碳酸化的化学反应为:



钠长石的溶解的化学反应为:

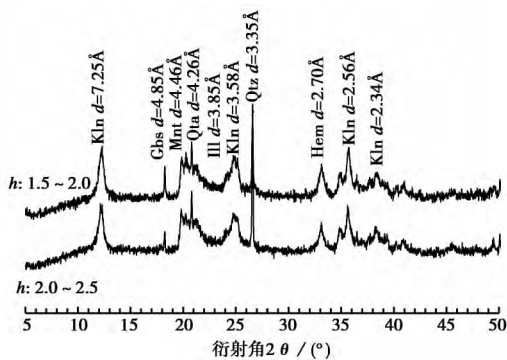
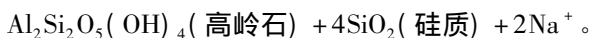
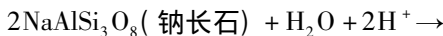


图2 X射线衍射图谱

Fig. 2 X ray diffraction patterns of basalt residual soil

3.2 化学成分

根据雷州半岛玄武岩残积土的能谱图谱(图4)及相应分析结果(表4)可知,该土中的金属元素主要是Si、Al、Fe和少量的Ti。还发现不同微区的元素构成与相对含量接近,说明金属元素的分布较均匀。与此对应的是土中金属氧化物主要是

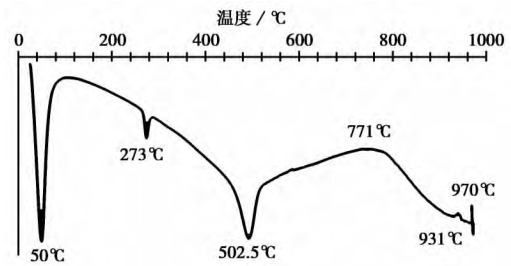


图3 差热曲线

Fig. 3 DTA curve of basalt residual soil

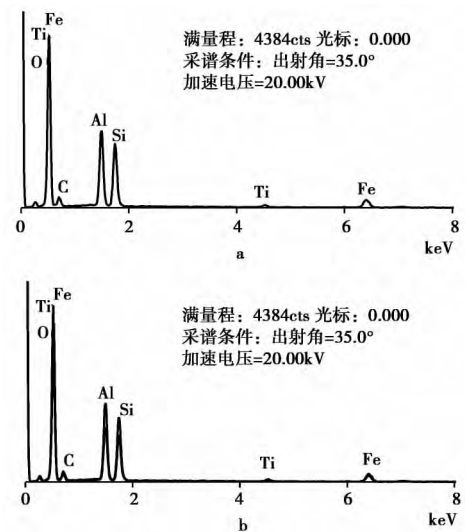


图4 能谱分析图谱

Fig. 4 The EDS spectrum of basalt residual soils
a. 区域I; b. 区域II

表4 能谱分析结果

Table 4 Results of EDS tests of basalt residual soils

元素	重量百分比/(%)		原子百分比/(%)	
	区域I	区域II	区域I	区域II
C	7.00	7.14	10.61	10.86
O	64.06	63.61	72.89	72.61
Al	11.31	10.95	7.63	7.41
Si	9.57	9.58	6.20	6.23
Ti	0.70	0.82	0.27	0.31
Fe	7.36	7.90	2.40	2.58

SiO₂、Fe₂O₃和FeO、Al₂O₃和少量的TiO₂,其中铁的氧化物以被氧化的高价铁为主,Mn、Ca、Mg、Na、K属微量元素(表5)。由于本区中残积土含有大量高岭石组矿物,在高温下颗粒间水失重现象明显(这从图3所示的差热曲线也可以看到),也造成高温下烧失量达15%以上。该土的硅铝比小于1.9,大量的高岭石矿物的出现标志着该区经过了强烈的

表5 玄武岩残积土的化学成分

Table 5 Chemical compositions of basalt residual soil

埋深/m	相对含量 $\omega(B)$ / (%)										烧失量	$\frac{\text{SiO}_2}{\text{Al}_2\text{O}_3}$	$\frac{\text{SiO}_2}{\text{R}_2\text{O}_3}$
	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	FeO	Al ₂ O ₃	TiO ₂	MnO	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O			
1.5~2.0	33.00	17.85	0.98	30.52	1.75	0.11	0.21	0.17	0.09	0.05	15.25	1.84	1.39
2.0~2.5	32.34	17.76	0.95	30.02	1.75	0.09	0.15	0.10	0.1	0.1	16.62	1.83	1.33

表6 玄武岩残积土的化学分析结果

Table 6 Chemical analyzed results of basalt residual soils

埋深/m	pH 值	有机质 / (%)	阳离子交换量 (CEC) meq/100g	易溶盐 / (%)	中溶盐 / (%)	难溶盐 / (%)	总表面积 /m ² ·g ⁻¹	外表面积 /m ² ·g ⁻¹
1.5~2.0	5.0	0.34	14.63	0.02	0.13	0.06	129	56.22
2.0~2.5	5.1	0.15	13.25	0.05	0.09	0.06	113	52.20

表7 玄武岩残积土的氧化物含量

Table 7 Oxygenates content of basalt residual soils

埋深/m	游离氧化物 / (%)				无定形氧化铁 / (%)	游离度 / (%)	活化度
	游离氧化铁	游离氧化铝	游离氧化硅	总量			
1.5~2.0	10.69	4.36	1.36	16.41	1.02	56.77	9.54
2.0~2.5	11.03	5.23	1.45	17.71	1.36	58.95	12.33

风化阶段,反映出玄武岩残积土发育过程经历了明显的富铝化、铁富集和盐淋失过程,表现为 SiO₂ 大量淋失、FeO 受风化、氧化作用大量减少,Fe₂O₃ 和 Al₂O₃ 大量累积,MgO、Na₂O、K₂O 被大量淋失。

从表6可知,雷州半岛玄武岩残积土的 pH 接近 5.0,有机质含量较低,可溶盐含量较低,碳酸钙与石膏含量亦较低,这与本区淋滤作用强烈是吻合的,也反映出这些物质不是造成该土具有较高结构强度的胶结物质。该土的外比表面积大于 50m²·g⁻¹,可能具有大量的微孔隙,但总的比表面积并不是很大,阳离子交换量为 14.63~13.25meq/100g。鉴于玄武岩残积土中含有大量 Al、Fe 成分,而游离态的氧化铁与氧化铝是构成结构中重要的胶结物质^[10] 我们对雷州半岛玄武岩残积土的游离氧化物进行了测试,见表7。该区残积土的游离氧化 Al、Fe、Si 含量高达 16.41%~17.71%,主要以游离氧化铁为主,无定形氧化铁含量较少。由于含有这些胶质成分,导致该土的活性受到限制,活动性 A_d 为 0.43~0.64,属低活性土。

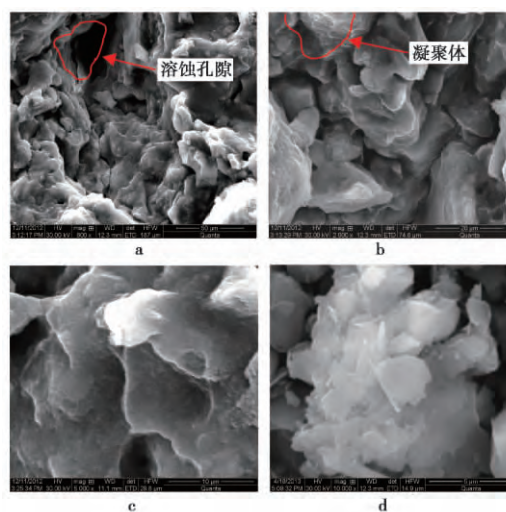


图5 扫描电镜照片

Fig. 5 The SEM photograph of basalt residual soil

a. 原状样放大 800 倍; b. 原状样放大 2000 倍;
c. 原状样放大 5000 倍; d. 去游离氧化铁 放大 10000 倍

4 玄武岩残积土的结构特征

4.1 结构形态

雷州半岛玄武岩残积土的扫描电镜图片(图

5) 在较小放大倍数下可以看到该土结构为致密的块体构造,表面附着星星点点的氧化铁颗粒,有风化形成的溶蚀孔隙(图5a),在较大放大倍数下观察可见块体颗粒表面有大量的微小孔隙(图5c)。玄武岩残积土的结构基本为凝胶和絮凝结构为主,偶见骨架结构,风化严重部分可以看见一些类似矿物叠片堆叠形成的絮凝体(图5b)。土中的基本结构单元体被游离氧化铁以及黏土中起胶结作用的物质覆盖(经能谱测试,胶结元素为Fe和Al),构成次级结构单元体,外形以团粒状为主,这些团粒又以边-面的镶嵌接触方式,构成开放式的胶质联结的絮凝结构。这种结构虽然与海相沉积土的絮凝结构相似,表现为结构疏松,有大孔隙存在,但不同的是具有较高的结构强度,这是因为一方面经风化淋溶作用,松散结构间还存有剩余的化学键强度,另一方面,风化淋溶出的胶体氧化物在微粒间产生的胶结作用强化了结构强度。我们采用选择溶解法^[11]去除了土中的游离氧化铁,惊奇地发现,天然状态下的团粒其实是由直径数微米长的扁平状的高岭石类矿物单片,以面-面接触的方式构成迭聚体,这类迭聚体与膨胀土中的卷平状的蒙脱石矿物构成的迭聚体是不同的,它们不是颗粒堆迭在一起的而是由长石或云母在酸性环境下逐步转化为高岭石的风化淋溶的结果,还保留着原矿物内部构造特征^[12],而游离氧化铁作为一种胶结物质包裹这些迭聚体形成体积相对较大的团聚体。

4.2 孔隙特征与分布

作为高孔隙的雷州半岛玄武岩残积土的孔隙类型主要是溶蚀孔、堆孔与微孔。溶蚀孔是红土化作用下原岩矿物溶解残留的孔隙,体积较大;堆孔是颗粒或团粒在堆积过程形成的;微孔多存在于团粒和絮凝体内,体积较小。根据压汞试验结果可知,雷州半岛玄武岩残积土的孔隙特征最显著特点是含有大量的微孔,可占总孔隙体积的70%以上,表现在图6a中,孔径 $d < 0.1 \mu\text{m}$ 的孔隙分布曲线上有突出的尖锐峰,在图6b中, $d < 0.1 \mu\text{m}$ 后的累积孔隙体积曲线斜率突然增大。这类孔隙虽然体积小,但数量多,造成总体积明显大于 $d > 10 \mu\text{m}$ 的溶蚀孔体积。

5 讨论

从上述试验结果分析可知,雷州半岛玄武岩残积土的特殊工程地质特性主要是其独特的物质组

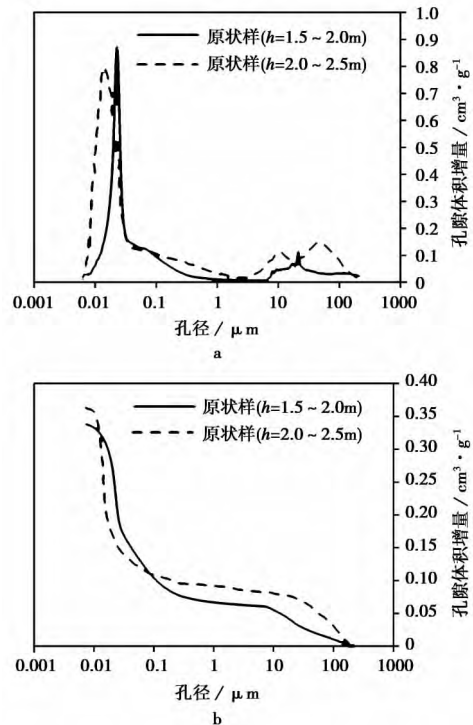


图6 孔径分布曲线

Fig. 6 Pore size distribution curves of basalt residual soil
a. 孔径分布曲线; b. 累积孔隙体积曲线

成与结构特征引起的。玄武岩残积土系一种强风化产物,富含高岭石类的黏土矿物,导致该土具有高黏性、强收缩势。但另一方面,该土含有大量的游离氧化铁,一般认为,黏粒矿物的边带正电荷,面带有负电荷,在这种酸性环境下(雷州半岛玄武岩残积土的pH约为5.0),氧化铁的表面带有正电荷,这样就产生了一种静电引力,形成了以胶结联结,同时,游离氧化铁、铝又以“包膜”形式包裹颗粒形成团聚体,这种作用相当于增加了土中的粉粒成分,造成该土具有较高的内摩擦角,颗粒间的强胶结力导致该土具有较高的黏聚力。由于长期处于湿润条件下,赋存与孔隙溶液中的游离的胶态的氧化铁可能会对黏土表面斥力起到一定抑制作用,但当土被扰动重塑,或在干湿循环条件下游离氧化铁逐步变为晶质态,造成胶结力的减损,土的收缩性逐渐显露,这也造成雷州半岛地区旱季地表龟裂、纵向裂缝现象时有发生。

雷州半岛玄武岩具有较多的溶蚀大孔与微孔,大量的微孔比表面积大,吸附效应强,水很容易通过溶蚀形成的大孔隙进入土中,土体内部的微小孔隙以及结构缺陷中的孔隙被进入的水压迫产生超张应力,是原结构缺陷发生扩容,导致土体产生遇水软化

现象,严重时发生崩解现象,这也引发当地大面积的崩岗地质灾害,造成破坏严重的水土流失现象。

正是由于雷州半岛玄武岩残积土具有对水敏感、抗水性差特点,浸水饱和后其力学性质劣化明显,土具有明显的崩解特性,特别是结构扰动和干湿循环后,崩解性明显增强。雷州半岛地处炎热多雨地带,施工中应重点关注降雨引发的工程灾害。

6 结 论

(1) 雷州半岛玄武岩残积土属一种区域性特殊土,它具有与沉积黏土相似的较差的物理特性,如孔隙比较大、液限较高,同时具有与黏性土相似的高黏聚力与粉质土相似的高内摩擦角,还具有强收缩性、遇水湿化、易崩解特性。

(2) 雷州半岛玄武岩残积土发育过程经历明显的富铝化、铁富集和盐淋失过程,黏土矿物以高岭石、三水铝石和伊利石为主,游离的氧化铁、铝是结构中重要的胶结物质。

(3) 扁平状的高岭石类矿物作为玄武岩残积土的基本结构单元,以面-面接触的方式堆迭,由游离氧化铁等胶结作用形成迭聚体作为次级结构单元,这些迭聚体又以边-面的镶嵌接触方式构成致密的凝块结构和开放式的絮凝结构。

(4) 雷州半岛玄武岩残积土的特殊工程地质特性与其物质成分和结构特征密切相关。其较强的结构强度来源于氧化铁、铝的强胶结力以及残存和新生的化学键力。

(5) 雷州半岛处于炎热多雨,干湿季节变化明显的热带季风气候,干湿循环等环境因素变化对土的强度劣化效果显著,应加强环境变化引起该区玄武岩残积土的相关灾害研究。

参 考 文 献

[1] 唐大雄,王清,张庆云等. 雷琼地区玄武岩残积红土的工程地质研究[J]. 长春地质学院学报,1992,22(3): 317~323.
Tang Daxiong, Wang Qing, Zhang Qingyun, et al. Engineering geological study of residual laterite soil of basalt in Leiqiong region [J]. Journal of Changchun University of Earth Sciences, 1992, 22(3): 317~323.

[2] 王国华,陈海明. 雷州半岛玄武岩残积土工程特性试验[J].

华北水利水电学院学报,2011,32(3): 67~71.
Wang Guohua, Chen Haiming. Experimental study on engineering properties of residual soil of basalt in Leizhou peninsula [J]. Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, 2011, 32(3): 67~71.

[3] 劳国利. 海南岛土类的分布概况及物理力学特性[J]. 岩土力学,1988,9(4): 51~61.
Lao Guoli. Distribution survey of soils in the Hainan Island and their physic-mechanical properties [J]. Rock and Soil Mechanics, 1988, 9(4): 51~61.

[4] Gutierrez N H, Nóbrega M T, Vilar O M. Influence of the microstructure in the collapse of a residual clayey tropical soil [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2009, 68(1): 107~116.

[5] Lohnes R A, Demirel T. Geotechnical properties of residual tropical soils [C]. Proc. ASCE Convention, Huston, Texas: 1983, 150~166.

[6] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京,中国农业科技出版社,1999.
Lu Rukun. Analysis of soil agricultural chemistry [M]. Beijing: China Agriculture Science and Technology Press, 1999.

[7] Sparks D L, Page A L, Loepfert P A. et al. Methods of soil analysis part 3: chemical methods. Soil Science Society of America and American Society of Agronomy, Madison, WI. 1996.

[8] 张乃娴,李幼琴,赵慧敏等. 黏土矿物研究方法[M]. 北京: 科学出版社,1990.
Zhang Naixian, Li Youqin, Zhao Huimin, et al. Research methods of clay minerals [M]. Beijing: Science Press, 1990.

[9] 蒋梅茵,杨德湧. 玄武岩发育的几种红壤的矿物特征[J]. 土壤学报,1991,28(3): 268~275.
Jiang Meiyin, Yang Deyong. Mineralogical properties of several red earths developed from basalt [J]. Acta Pedologica Sinica, 1991, 28(3): 268~275.

[10] 张先伟,孔令伟,王静. 针对黏性土胶质联结特征的 SEM-EDS 试验研究[J]. 岩土力学,2013,34(增2): 195~203.
Zhang Xianwei, Kong Lingwei, Wang Jing. Experimental study of SEM-EDS for cementation bond characteristics of Zhanjiang clay [J]. Rock and Soil Mechanics, 34(S2): 195~203.

[11] Gasparatos D, Haidouti C, Tarenidis D. Characterization of iron oxides in Fe-rich concretions from an imperfectly drained Greek soil: A study by selective dissolution techniques and X-ray diffraction. Archives of Agronomy and Soil [J], 2004, 50(4-5): 485~493.

[12] 高国瑞. 中国红土的微结构和工程性质[J]. 岩土工程学报, 1985, 7(5): 10~21.
Gao Guorui. The microstructures and engineering properties of red soil in China [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1985, 7(5): 10~21.