

腾冲地区玄武岩残积粘土物理力学性能研究

杨荣美¹, 陈安¹, 槐以高², 眭素刚²

(1. 昆明理工大学国土资源工程学院, 昆明 650093;

2. 中国有色金属工业昆明勘察设计研究院, 昆明 650051)

摘要: 为了研究腾冲地区广泛分布的玄武岩残积粘土的物理力学性能, 通过比重试验、含水率试验、固结试验等室内土工试验及现场原位测试获取相关试验参数, 并进行室内理论分析, 结果表明: 腾冲地区玄武岩残积粘土化学成份以 SiO_2 、 Al_2O_3 和 Fe_2O_3 为主; 玄武岩残积粘土的含水率介于 14%~95% 之间, 平均值为 49.44%, 孔隙比介于 0.48~2.56 之间, 平均为 1.44, 饱和度介于 46~100 之间, 平均值为 92.52, 湿密度介于 1.36~2.13, 平均值为 1.68; 压缩系数 a_{1-2} 为 0.67 MPa^{-1} , 属于高压缩性土, 土体结构松散, 物理力学性质空间变化大, 直剪快剪黏聚力 C 为 40.13 kPa, 内摩擦角 φ 为 7.44° , 强度相对较低。

关键词: 腾冲地区; 玄武岩残积粘土; 物理力学性能; 工程特性

中图分类号: TU43; TU411 **文献标识码:** A

BASALT RESIDUAL CLAY IN TENGCHONG AREA RESEARCH ON PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES

YANG Rong-mei¹, CHEN An¹, HUAI Yi-gao², SUI Su-gang²

(1. School of Land and Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China;

2. Kunming Survey, Design and Research Institute of China Nonferrous Metals Industry, Kunming 650051, China)

Abstract: In order to study the physical and mechanical properties of basalt residual clay widely distributed in Tengchong area, The relevant test parameters were obtained through indoor geotechnical tests such as specific gravity test, moisture content test, consolidation test and field in-situ test, and indoor theoretical analysis was carried out. The results show that the chemical components of basalt residual soil in Tengchong area are mainly SiO_2 , Al_2O_3 and Fe_2O_3 ; The water content of basalt residual clay is between 14%~95%, the average value is 49.44%, the void ratio is between 0.48~2.56, the average value is 1.44, the saturation is between 46~100, the average value is 92.52, the wet density is between 1.36~2.13, the average value is 1.68; The compressibility coefficient a_{1-2} is 0.67 MPa^{-1} , which belongs to highly compressible soil. The soil structure is loose, the physical and mechanical properties vary greatly in space, the cohesion is 40.13 kPa, and the internal friction angle 7.44° , the strength is relatively low.

Key words: Tengchong area; basalt residual clay; physical and mechanical properties; engineering characteristics

玄武岩残积土具有稳定性差、孔隙比高、高液限、低强度等特性,早在1992年,唐大雄等^[1]发现雷琼地区玄武岩残积红土土质不均匀,且有高压缩性和弱抗水性;张丽、林英华^[2]建议在玄武岩残积土地上进行勘察或施工时,要着重关注标准贯入试验;李洪建等^[3]根据国内外有关岩体风化划分的参数值,研究获取了风化程度不同的岩体裂隙间距值的指标界线;王国华等^[4]发现雷州半岛玄武岩残积土含水率、液限和孔隙比较高, SiO₂ 含量和密度较低,在水中容易崩解,还给出相应参数的特征值建议;龙焕林^[5]研究并且评价了琼北地区玄武岩残积土的物理及力学性质;王参松^[6-7]、张瑞敏^[8]等对贵州二叠系峨眉山玄武岩残积土开展了研究,并且得知土体含水率变大的同时抗剪强度就会变小;张先伟等^[9-10]从化学和物理等角度进行研究,发现雷州半岛玄武岩残积土的主要粘土矿物为高岭石、伊利石和三水铝石,化学成分以 Fe₂O₃ 和 Al₂O₃ 为主;陈洁等^[11-12]以重塑红棕色玄武岩残积土为例,对干密度和含水率均不同的玄武岩残积土在不同加载方式下进行多级环剪试验来研究其残余强度;张浪^[13]等通过抗剪试验发现重塑红棕色玄武岩残积土含水率固定时,土的抗剪强度随干密度的增大而增大,干密度一定时,土的抗剪强度随含水率的增大而减小;冯春燕等^[14]对美兰机场玄武岩残积土进行承载力、变形特性及物理力学特性的研究,结果表明玄武岩残积土土层具有上细下粗的分布特点,未受扰动的玄武岩残积土密实度较好,地基承载力较高;师壮^[15]通过研究腾冲市曲石生态小镇玄武岩残积土发现玄武岩残积土在压应力作用下会引起孔隙压缩而引起土体变形从而导致地基沉降。

目前针对腾冲地区玄武岩残积土的研究较少,本文通过室内土工试验,从氧化物成分与含量、矿物成分、密度、比重、孔隙比、剪切强度等方面对腾冲玄武岩残积粘土进行分析,并对其工程特性进行判断,为玄武岩残积土地区工程建设及灾害治理提供基础性资料。

1 玄武岩残积粘土分布特征及化学成分

腾冲隶属云南省,坐落于滇西边陲,发育很多深大断裂,地壳极不稳定,境内分布有大量的第四系火山,火山地震活动频繁,而作为基性喷出岩的玄武岩,大量分布在腾冲境内。

腾冲地区玄武岩风化后形成的残积土在外观上与碳酸盐红黏土相似,但色泽稍暗,呈灰黄色、褐黄

色、褐红色,一般呈可塑-硬塑状态,玄武岩原地风化以后经过长时间的堆积和残留形成较为松散的玄武岩风化层,风化层向上逐渐过渡为土壤层,向下逐渐过渡为风化基岩层,随着深度增加,粉土及粗砾增多而成为粉质粘土、碎石土。粘土层与玄武岩接触带一般含较多的母岩风化碎石土,粘土层在空间展布上表现出层厚差异较大,在颗粒组成上也表现出较大的差异。

腾冲地区玄武岩残积粘土层结构特征如下:黄褐、褐色及褐灰色,可塑状态,局部硬塑状态,稍湿,有光泽,无摇振反应,干强度及韧性中等,局部含玄武岩风化碎块,厚度一般为 0.60~10.30 m。

玄武岩残积粘土的主要矿物为高岭石,其化学成分主要为 SiO₂、Al₂O₃ 和 Fe₂O₃ (表 1)。

表 1 玄武岩残积粘土与碳酸盐类红粘土化学成分对比表

化学成分	不同土类的化学成分百分比/%		
	腾冲玄武岩残积粘土	雷州半岛玄武岩残积土	碳酸盐类红粘土
SiO ₂	38.64	33.00	68.13
Al ₂ O ₃	29.37	30.52	15.68
Fe ₂ O ₃	11.66	17.85	4.57
CaO	0.26	0.21	0.47
MgO	0.85	0.17	1.05
K ₂ O	0.15	0.10	2.65
Na ₂ O	0.14	0.10	0.07

从表 1 中可以看出,腾冲玄武岩残积粘土与雷州半岛玄武岩残积土化学成分相似。两地玄武岩残积土与碳酸盐类红粘土相比较,两类土中 SiO₂、Al₂O₃ 和 Fe₂O₃ 这 3 种化学成分含量较高,共占总含量的 80% 左右。不同的是,玄武岩残积土中 SiO₂、CaO 及 K₂O 的含量均低于红粘土,但 Al₂O₃ 和 Fe₂O₃ 的含量相比于红粘土要高一些。

2 腾冲玄武岩残积粘土物理性质

对腾冲地区玄武岩风化土进行室内土工物理试验,包括含水率试验、密度试验、液塑限试验、颗粒分析试验、比重试验、固结试验及原位试验等。比重试验结果如表 2 所示。

表 2 玄武岩残积粘土物理性质指标(比重)

岩土名称	比重		
	最大值	最小值	平均值
玄武岩残积粘土	2.89	2.34	2.70

玄武岩残积粘土天然含水率变化大,因为土体表面风化后会产生裂隙,裂隙壁周围快速失水,裂隙发育的残积土表层的含水率一般比较深土层处的含水率低,天然含水率也会产生一定区间范围的波动。腾冲地区玄武岩残积土的天然含水率、孔隙比变化

范围如表 3 所示。

表 3 玄武岩残积粘土物理性质指标

岩土名称	含水率/%			孔隙比		
	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值
玄武岩残积粘土	95	14	49.44	2.56	0.48	1.44

从表 3 可以看出玄武岩残积粘土的含水率、孔隙比等指标波动范围较大,且天然含水率较高,孔隙比较大。玄武岩残积粘土水理性试验结果如表 4 所示。

表 4 玄武岩残积粘土物理性质指标(水理性)

岩土名称	水理性指标	液限 /%	塑限 /%	塑性指数 / I_p	液性指数 / W_L
玄武岩残积粘土	最大值	100	67	48	1.05
	最小值	23	16	4	-1.0
	平均值	62.3	39.5	22.5	0.39

根据表 4 可以看出,粘土的液塑限含水率高,塑性指数大于 17,天然状态为可塑状态。土体含水率和孔隙比均较高,属高液限粘土。

土的颗粒级配是指土中所含各粒组的相对含量,以土粒总重的百分数表示。土的颗粒级配曲线:纵坐标表示小于某土粒的累计质量百分比,横坐标则是用对数值表示的土的粒径。一般用土的不均匀系数 C_u (按公式 1 计算)、曲率系数 C_c (按公式 2 计算)来表示土的颗粒级配情况。规范规定: $C_u \geq 5$ 且 $C_c = 1 \sim 3$ 的土为级配良好,不同时满足则为级配不良。

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (1)$$

$$C_c = \frac{(d_{30})^2}{d_{10} * d_{60}} \quad (2)$$

表 6 腾冲地区玄武岩残积层风化土物理试验参数汇总表

岩土参数 地层岩性	统计项目	含水率 (ω)/%	湿密度(ρ_w)/ $g \cdot m^{-3}$	比重 (ρ_s)	天然孔隙比 e_0	饱和度 (Sr)/%	界限含水率指标				渗透系数(K)/ $cm \cdot s^{-1}$
							液限 W_L	塑限 W_p	塑性指数 I_p	液性指数 I_L	
腾冲玄武岩残积粘土	最大值	95	2.13	2.89	2.56	100	100	67	48	1.05	8×10^{-5}
	最小值	14	1.36	2.34	0.48	46	23	16	4	-1.0	7.8×10^{-7}
	平均值	49.44	1.68	2.70	1.44	92.52	61.68	39.53	22.45	0.39	1.47×10^{-5}
雷州半岛玄武岩残积土	平均值	38.09	1.64	2.80	1.37	78.48	58.01	31.1	26.91	0.27	5.56×10^{-6}
贵州玄武岩残积土	平均值	40.1	1.71	2.77	1.1~1.3	—	75.9	47.2	28.7	-0.25	—

腾冲地区玄武岩残积粘土相较于贵州和雷州半岛玄武岩残积土,物理指标相似,差别不大,总体上表现为天然含水率、孔隙比、饱和度较高,而密度、渗透性较低。

3 腾冲玄武岩残积粘土的力学性质

本次研究粘土完成了 767 组固结试验,以 50~

式中, d_{10} 为级配曲线上纵坐标为 10% 所对应的粒径,也称为有效粒径; d_{30} 为级配曲线上纵坐标为 30% 所对应的粒径,也称为中值粒径; d_{60} 为级配曲线上纵坐标为 60% 所对应的粒径,也称为限定粒径。

玄武岩残积粘土的不同粒组质量百分比如表 5 所示,级配曲线如图 1 所示。

表 5 玄武岩残积粘土物理性质指标(粒度分析)

岩土名称	粒径/mm	含量/%
玄武岩残积粘土	>2	3.1
	2~0.5	10.48
	0.5~0.25	5.81
	0.25~0.075	10.27
	0.075~0.05	19.46
	0.05~0.01	26.85
	0.01~0.005	7.46
<0.005	16.57	

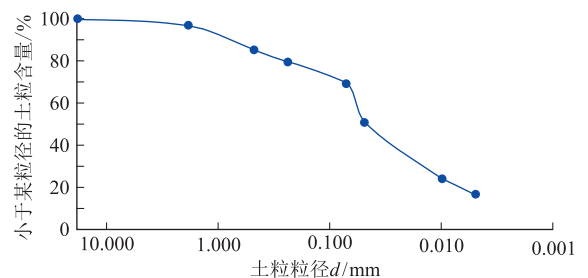


图 1 玄武岩残积粘土级配曲线图

通过表 5 及图 1 可知,玄武岩残积粘土的粒径以 0.075~0.01 mm 的颗粒占总含量的 60%,不均匀系数 C_u 为 30,曲率系数 C_c 为 1.875,颗粒曲线较为平缓,级配良好。腾冲玄武岩残积粘土的物理试验参数如表 6 所示。

400 kPa 分级测定其孔隙比、压缩系数及压缩模量值。图 2 为玄武岩残积粘土 $e-p$ 曲线,玄武岩残积粘土的变形参数如表 7 所示。

由图 2 可知随着压力增大,土样孔隙比减小,剧烈变化段集中在 200 kPa 前;由表 7 可以看出,粘土孔隙比较大,压缩系数大于 $0.5 MPa^{-1}$,属高压缩性土。

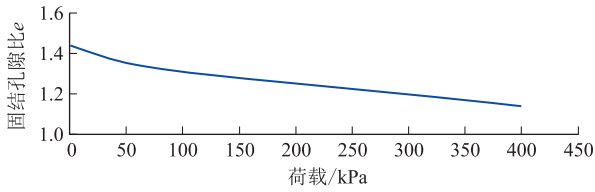


图 2 玄武岩风化残积粘土 $e-p$ 曲线图

本文以腾冲各工程项目的室内剪切试验为依托,分析统计了在不同试验条件下的玄武岩残积粘

土抗剪强度。通过标准固结试验得到玄武岩风化土在各荷载作用下的孔隙比见表 8。

通过试验数据表 8 可知,粘土的黏聚力较高,与粘土的粘粒含量较高有关,内摩擦角较低,与粘土的粗粒土含量稍低有关。相较于直剪快剪,固结快剪的黏聚力提高了 12.52 kPa,内摩擦角增大了 10.21°,这是由于固结快剪提供了一定时间排水,充分排水后,孔隙水压力完全消散,改善了土体情况,提高了土体强度。

表 7 玄武岩残积粘土变形试验参数统计

岩土名称	荷载 /kPa	孔隙比	0.1~0.2 MPa		0.2~0.4 MPa	
			压缩系数 a_{1-2}/MPa^{-1}	压缩模量 E_{s1-2}/MPa	压缩系数 a_{1-2}/MPa^{-1}	压缩模量 E_{s1-2}/MPa
	0	1.44				
	50	1.35				
玄武岩残积粘土	100	1.31	0.67	4.43	0.47	6.19
	200	1.25				
	400	1.14				

表 8 玄武岩残积粘土强度试验指标

岩土名称	孔隙比/ e	直剪快剪		固结快剪	
		黏聚力 c/kPa	摩擦角 $\varphi/^\circ$	黏聚力 c/kPa	摩擦角 $\varphi/^\circ$
玄武岩残积粘土	1.44	40.13	7.44	52.65	17.65

腾冲地区共进行现场原位试验 1 259 次,其中标准贯入试验 794 次,重型圆锥动力触探试验 465 次,室内试验及原位测试成果见表 9、表 10。通过现

场试验,估算腾冲地区玄武岩风化土的强度和密实度,评定腾冲地区地基的均匀性。腾冲地区玄武岩残积粘土力学参数如表 11 所示。

表 9 土层重型圆锥动力触探试验成果统计表

岩土名称	重型圆锥动力触探试验击数 N63.5 (击)/10 cm			
	修正最小值	修正最大值	平均值	统计频数
玄武岩残积粘土	1.9	15.2	7.57	470

表 10 标准贯入试验成果统计表

岩土名称	实测锤击数 N (击)				
	统计次数	标贯实测锤击数范围值	标贯实测锤击数算术平均值	标贯修正锤击数算术平均值	标准差 δ
玄武岩残积粘土	1 043	2~19	8.12	7.51	2.75

表 11 腾冲地区玄武岩残积粘土力学试验参数汇总表

岩土参数	自由膨胀率 $\delta_{ef}/\%$	压缩指标		直剪快剪		固结快剪	
		压缩系数 a_{1-2}/MPa^{-1}	压缩模量 E_{s1-2}/MPa	黏聚力 c/kPa	摩擦角 $\varphi/^\circ$	黏聚力 c/kPa	摩擦角 $\varphi/^\circ$
腾冲玄武岩残积粘土	15	0.67	4.43	40.13	7.44	52.65	17.65
雷州半岛玄武岩残积土	35.47	0.39	6.06	—	—	43.3	21.55
贵州玄武岩残积土	—	0.32	6.88	—	—	30.99	27.46

由表 11 可知,腾冲地区玄武岩残坡积粘土在天然状态下自由膨胀率为 15%,基本无膨胀性。相较之下,雷州半岛玄武岩残积土自由膨胀率较高,当含水率增至液限时,存在较强的收缩性。腾冲玄武岩残积粘土的压缩性比于雷州半岛及贵州玄武岩残坡积土高,压缩模量稍小,属于高压缩性土;其黏聚力高于雷州半岛及贵州玄武岩残坡积土,但抗剪强度明显小于后两者。

颗粒间的胶结力会影响土体的粘聚力,而内摩擦角则主要与颗粒的排列方式有关,腾冲地区玄武

岩残积粘土的化学成分以 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 和 SiO_2 为主,铁铝氧化物增强了土颗粒间的胶结能力,因此黏聚力较大。腾冲地区玄武岩残积粘土孔隙比较大,天然含水率较高,使得土体结构更加疏松,土颗粒间的阻力减弱,因此内摩擦角较小。

4 腾冲玄武岩残积粘土的工程特性

腾冲地区玄武岩残积粘土化学成分以 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 为主,亲水性较弱,宏观结构为似团块状结构,微观结构形态以凝块结构和团粒结构为主,

溶孔发育。残积粘土的天然含水量、液限、塑限及塑性指数较高,液性指数较低,呈可塑-硬塑状态,天然密度较小,孔隙比较大,在0.48~2.56之间。可塑状态的玄武岩残积粘土重型圆锥动力触探试验锤击数平均值为7.57击,标贯实测锤击数为2~19击。玄武岩残积粘土的塑性指数 I_p 变化范围较大,按 I_p 分类属粘土;液限范围为23%~100%,平均61.68%,属高液限粘土,不适宜做天然地基,若作为填土基础必须进行改良;渗透系数平均值为 1.47×10^{-5} cm/s,在天然状态下具有弱透水性,这是由于其粘粒含量较高且主要成分为蒙脱石。

腾冲玄武岩残积粘土自由膨胀率为15%,小于40%界限,该残积粘土无膨胀性。分析其化学成分,游离氧化物含量较多,胶结作用较强,粘土矿物的亲水性较差,在水理性质上亦表现为无膨胀性。腾冲地区玄武岩残积粘土的含水率较高,且腾冲地区经常有雨,空气潮湿,降低了玄武岩残积土的强度。玄武岩风化土强度受土体的含水率的制约,含水率较大则土体抗剪强度较小,玄武岩风化土对水的作用极为敏感,遇水后强度下降很快,这个特性对工程稳定性来说非常不利。降雨作用后,边坡土体抗剪强度会明显降低,严重影响其稳定性。腾冲玄武岩残积粘土属于高压缩性土,其物理力学性质空间变化较大,土质不均匀,个别场地物理、力学指标变异系数较高。总体上残积粘土强度相对较低。

5 结论

(1) 腾冲地区玄武岩残积粘土层厚差异较大,在地层分布上表现出残积粘土层与玄武岩层交错分布的现象;化学成分以 SiO_2 、 Al_2O_3 和 Fe_2O_3 为主,总占比可达80%左右。

(2) 腾冲地区玄武岩残积粘土天然密度较小,孔隙比在0.48~2.56之间,塑性指数在4~48之间,液限范围为23~100,平均61.68,天然状态为可塑状态,其重型圆锥动力触探试验锤击数平均值为7.57击,标贯实测锤击数为2~19击,渗透系数为 1.47×10^{-5} cm/s,在天然状态下具有弱透水性;粘土颗粒级配良好,土质不均匀。

(3) 腾冲地区玄武岩风化形成的粘土含水率介于14%~95%之间,平均值为49.44%,孔隙比介于0.48~2.56之间,平均为1.44,饱和度介于46~100之间,平均值为92.52,湿密度介于1.36~

2.13,平均值为1.68;与一般的玄武岩残积土相似,均表现为高含水率、高孔隙比、高饱和度和低密度等特性。

(4) 腾冲地区玄武岩风化残积粘土压缩系数 a_{1-2} 为 0.67 MPa^{-1} ,属高压缩性土,土体稳定性差,含水率变化对土体的整体抗剪影响较大,土体含水率越大,强度越低。

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.
- [2] 张丽,林英华. 多孔玄武岩残积土的特殊性质及工程对策[J]. 西部探矿工程,2004,(10):98-99.
- [3] 李洪建,聂德新,傅荣华. 不同地质环境下的玄武岩岩体结构评价指标的选取[J]. 工程地质学报,2009,17(3):363-366.
- [4] 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.
- [5] 龙焕林,张军. 琼北玄武岩残积土工程特性探讨[J]. 西部探矿工程,2012,24(2):24-26.
- [6] 王参松,雷学文,孟庆山,等. 贵州红棕色玄武岩风化土强度试验研究[J]. 工程勘察,2012,40(1):12-15+19.
- [7] 王参松. 贵州玄武岩残积土工程力学特性试验研究[D]. 武汉科技大学,2012.
- [8] 张瑞敏. 玄武岩残积土的物理力学特性研究[J]. 水利与建筑工程学报,2020,18(1):74-78.
- [9] 张先伟,李晶晶,李峻,等. 雷州半岛玄武岩残积土的物质成分与结构特征[J]. 工程地质学报,2014,22(5):797-803.
- [10] 张先伟,孔令伟,臧濛. 雷州半岛玄武岩残积土的工程地质特性研究[J]. 岩土工程学报,2014,36(5):855-863.
- [11] 陈洁,雷学文,孟庆山,等. 重塑红棕色玄武岩残积土的残余强度试验研究[J]. 人民长江,2016,47(7):86-90.
- [12] 陈洁,龙建文,雷学文,等. 贵州重塑黄褐色玄武岩残积土残余强度试验研究[J]. 广州建筑,2017,45(1):21-25.
- [13] 张浪,雷学文,孟庆山,等. 重塑红棕色玄武岩残积土抗剪强度特性试验研究[J]. 科学技术与工程,2017,17(4):269-272.
- [14] 冯春燕,杨永康,杨武,等. 美兰机场玄武岩残积土岩土工程特性试验研究[J]. 广州大学学报(自然科学版),2017,16(4):33-38.
- [15] 师壮. 腾冲市曲石生态小镇玄武岩残积土力学特性及建筑边坡稳定性分析[D]. 昆明理工大学,2020.
- [16] 张惠英,胡卸文. 合肥、南京粘土的胀缩特性[J]. 地质灾害与环境保护,1992,3(1):53-64.
- [17] 张品萃,胥建华. 土三轴压缩试验试验方法的对比探讨[J]. 地质灾害与环境保护,2003,14(1):57-60.
- [18] 杨建华. 不固结不排水剪试验中多个试样加荷与一个试样多级加荷的应用[J]. 地质灾害与环境保护,2005,16(2):212-214.
- [19] 郝腾飞,喻邦江. 粗颗粒含量对砾石土抗剪强度影响的试验研究[J]. 地质灾害与环境保护,2018,29(3):73-76.

作者简介: 杨荣美(1996—),女,硕士研究生,地质工程专业,研究方向:工程地质、岩土工程设计。E-mail:1125756896@qq.com

通讯作者: 陈安(1971—),男,博士,高级工程师,研究方向:岩土工程、地质工程、地下水灾害防治。E-mail:373034075@qq.com