

文章编号: 1007-2993(2024)06-0740-05

海口超轻质火山灰软黏土成因及物理力学性质研究

谢书岭 谢林汐 翟凤艳 王影 杨永康
(海南有色工程勘察设计院, 海南海口 570100)

【摘要】 结合海南岛某建设工程场地岩土工程勘察成果, 总结了琼北地区高阶地及火山岩台地局部分布的火山灰沉积土岩土参数特性, 探讨该类型特殊土岩土工程特性。通过现场钻探、标准贯入试验、波速测试及室内土物理力学试验、光释光测试、X 荧光半定量全分析及矿物 X 射线衍射分析等, 探讨其沉积成因、时代, 提出基本工程特性参数建议值, 为该类型土利用和地基处理提供依据, 减少工程风险发生。

【关键词】 轻质; 火山灰; 海湾泻湖沉积; 海口软土; 超高压缩性; 高灵敏度和触变性

【中图分类号】 TU41

【文献标识码】 A

doi: 10.3969/j.issn.1007-2993.2024.06.015

Origin and Physical-Mechanical Properties Study of Haikou Ultra-Lightweight Volcanic Ash Soft Clay

Xie Shuling Xie Linxi Zhai Fengyan Wang Ying Yang Yongkang
(Hainan Non-ferrous Engineering Investigation and Design Institute, Haikou 570100, Hainan, China)

【Abstract】 A comprehensive geotechnical investigation was conducted at a construction project site on Hainan Island. Specific geotechnical parameters of volcanic ash deposits in high-order areas and volcanic rock plateaus in northern Hainan Island were summarized. The distinct engineering characteristics of this unique soil and rock type were investigated. A multi-faceted approach was employed, including on-site drilling, standard penetration tests, seismic velocity tests, laboratory soil physical-mechanical experiments, optically stimulated luminescence tests, X-ray fluorescence semi-quantitative analysis, and mineral X-ray diffraction analysis. The depositional origin and era of these deposits were examined. Furthermore, recommended values for fundamental engineering characteristic parameters were proposed, providing a solid foundation for the utilization and foundation treatment of this soil type, thereby reducing engineering risks.

【Key words】 soft soil; volcanic ash; bay and lagoon deposition; Haikou soft soil; ultra-high compressibility; high sensitivity and thixotropism

0 引言

在海南岛琼北火山岩台地及海岸沉积高阶地地貌区, 勘探钻孔内常遇到一种灰色、灰白或灰黑色超轻质黏土, 具有典型的低强度、低重度、高液限、饱和、高含水量、高孔隙比、高压缩性特性, 沉积厚度一般 0.50 ~ 2.0 m。海口雷琼国家火山口地质公园西北局部区域薄层凝灰岩下揭露一套深厚的超轻质火山灰质黏土, 现场钻探岩芯观察明显具有一定的强度, 手触呈软塑—可塑状, 但室内试验数据反映其同时具有低强度、高灵敏度, 高压缩性, 欠固结, 富含有机

质等软土之物理力学特性。工程建设中, 处理不当会造成建筑物沉降量严重超标, 沉降变形时间周期长, 且易出现不均匀沉降, 甚至导致工程倾斜, 危及建设工程安全。

目前, 限于火山灰质沉积土分布地域局限性, 国内外对火山灰质沉积土开展的基础研究成果有限, 对火山灰质软土成因及工程性质研究较少。墨西哥软土分布面积广、沉积厚度大, 土体含水量最高达 400%, 为满足工程建设需要, 自 1968 年起, 当地岩土技术人员开展了大规模的勘察、试验和研究, 取得了

作者简介: 谢书岭, 男, 1965 年生, 汉族, 河南杞县人, 大学本科, 正高级工程师, 主要从事岩土工程、水工环地质方面的工作。
E-mail: swyt8@126.com

丰富的研究成果,“墨西哥 Texcoco 抽水造湖”工程是岩土工程艺术性的充分体现^[1]。近年来,国内专家学者针对“一带一路”沿线国家项目建设开展了火山灰沉积软土工程地质特征及相应地基处理和桩基工程试验研究,取得了一批研究成果^[2-4]。但针对我国境内分布的火山灰质软土的研究较少。

本文通过对海口地区分布的超轻质火山灰软土沉积环境和物理力学性质研究,揭示其独有工程特性,以便在工程实践中采取预防和处理措施,减少因认识偏差导致工程风险,确保建筑物的安全运行,为岩土工程技术人员提供工程勘察、设计依据和借鉴。

1 海口超轻质火山灰软黏土沉积特征

1.1 区域地质环境及地层结构

海南岛作为华南板块的一部分形成于加里东期,至燕山期形成陆内 NE 向断陷盆地,喜山期在琼北出现陆内 E-W 向陆内裂谷带。沿此裂谷带呈串珠状分布火山岩,形成琼北火山岩台地地貌,台地区普遍发育多期次玄武熔岩及火山喷出沉积凝灰岩,垂向上呈现多层次土岩组合结构,表现为火山岩及其风化残积土与海陆交互沉积砂土或黏性土交互特征。

某建设工程场地及其附近岩土工程勘察时,钻探揭露一套厚度巨大的超轻质黏性土组合,其室内土工试验物理指标符合软土特征,但野外钻探岩土样呈软塑—可塑状表现状态。工程勘察深度 100.00 m 范围内钻孔资料,地层沉积剖面由上至下为:

①素填土(Q_4^{ml}):杂色,松散,湿—饱和;厚度 1.50~6.60 m。

②强风化凝灰岩(γQ_4^{mc}):灰色,饱和,凝灰质碎屑结构,薄层状构造,风化强烈,极破碎,厚度 0.50~4.80 m。

③黏土(Q_4^{mc}):灰黑色—青灰色,饱和,软塑—可塑,见少量腐殖质,厚度 0.80~5.70 m。

④泥炭(Q_4^{mc}):灰褐—灰黑色,饱和,软可塑,以腐质植物枝干、木屑混黏土为主,厚度 3.40~14.20 m。

⑤超轻质火山灰软黏土(Q_3^{mc})分上下两段,总厚度 5.00~50.00 m。

⑤-1 超轻质火山灰软黏土上段:深灰色—灰色,饱和,岩芯呈软塑—可塑状,可直立。手搓滑腻感强烈、黏手,局部见未完全分解的暗色物质,岩芯样似棉絮状,手感土质极轻。

⑤-2 超轻质火山灰软黏土下段:浅灰色为主,饱和,野外钻探鉴别可塑状为主,钻探岩芯呈柱状,直立性好,具明显类似页岩的水平微细层理(见图 1),手

感土质由极轻—轻过渡,切面稍光滑、干强度低,用手指易掰碎。



图 1 超轻质火山灰软黏土水平层理

⑥层凝灰质泥岩(Q_2^{mc}):灰—青灰色,泥质结构为主,中—厚层状构造,岩芯呈坚硬塑土状,局部偶见中等风化玄武岩孤石。揭露厚度大于 10.00 m,未揭露。典型地质剖面见图 2。

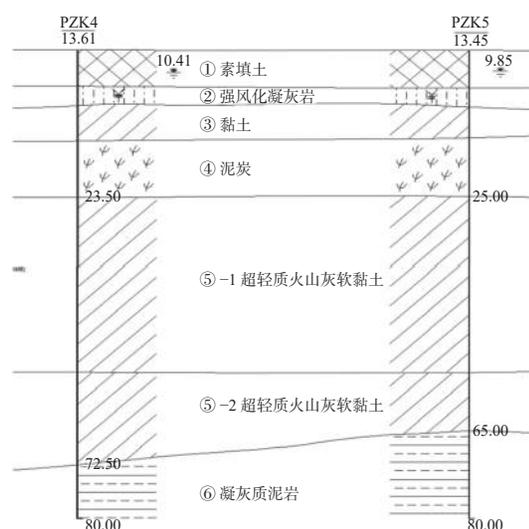


图 2 典型工程地质剖面图

本文重点研究⑤层超轻质火山灰软黏土。

1.2 超轻质火山灰软黏土化学组分特征

据钻孔中采取 7 件土试样进行 X 荧光半定量全分析,土化学成分以二氧化硅(SiO_2)、碳合物(有机质)、三氧化二铝(Al_2O_3)、氧化钙(CaO)、总铁(TFe)为主,含微量硫、磷、锰等元素,分析成果见表 1。

表 1 海口超轻质火山灰软土主要化学组分表 %

元素	SiO_2	TC	Al_2O_3	TFe	CaO
最大值	60.54	20.10	11.87	9.18	22.28
最小值	43.57	14.60	6.80	3.97	0.97
平均值	56.26	18.17	9.59	7.28	5.28

1.3 超轻质火山灰软黏土矿物组成特征

现场采取 5 件试样经室内矿物 X 射线衍射分析,主要以黏土类矿物为主,平均含量 44.9%,其次为石

英, 平均含量 33.8%, 少量的文石、斜长石、白云石等, 主要矿物组成见表 2。

表 2 矿物 X 射线衍射分析结果统计表含量 %

矿物	石英	斜长石	方解石	文石	白云石	石盐	赤铁矿	黏土矿物
最大值	39.8	4.4	2.2	19.7	5	2.8	5.6	49.6
最小值	23.5	2.4	0.5	1.8	1.12	0.5	1.6	36.6
平均值	33.8	3.66	1.2	7.21	2.57	1.4	2.4	44.9

1.4 超轻质火山灰软黏土沉积环境分析

研究场地位于琼北火山岩台地, 东距海口市石山全新世火山群约 10 km。区域地层资料显示, 场地周边区域发育地层主要为第四系上更新统道堂组 (Q_3d) 厚度 0.8 ~ 20.0 m 不等玄武岩或凝灰岩及其残积土, 下伏中下更新统不同成因类型松散沉积物、新近系上新统海口组 (N_2h) 滨浅海相生物碎屑岩夹海相基性火山岩。

据现场工程地质调绘, 区域地形总体较平坦, 超轻质土分布范围内地面较四周有轻微下陷, 与周边火山岩台地地貌形态无明显变化; 但沉积地层结构与周边地层剖面显著不同, 表层断续覆盖的火山堆积凝灰岩之下沉积了总厚度超过 60 m 的泥炭质黏土及富含有机质的超轻质火山灰软黏土; 上部层段夹腐质植物枝干富集的泥炭, 下部超轻质火山灰软土土质细腻、微细水平层理发育 (见图 3), 层间可见保存完好的水平状态植物叶片 (见图 4), 显示为静水环境沉积。



图 3 软黏土水平层理面



图 4 保存完整的树叶印痕

据现场钻探取样室内光释光测试, 测得其地质

年龄为 21.54±0.94 ka, 对应地质时代属第四纪晚更新世。考虑其化学组分、矿物含量特征, 结合该区域火山喷发活动频繁, 综合分析推测属晚更新世封闭一半封闭海湾泻湖静水环境火山灰沉积而成, 与墨西哥软土相似。

2 海口超轻质火山灰软黏土物理性质及土的分类

2.1 野外鉴别及结构特征

据野外现场钻探岩芯鉴别, 天然状态呈深灰—灰色, 手捻触感滑腻, 捻面光滑, 似泥糊状极黏手; 见暗褐色条状包裹物, 呈软—可塑状; 土骨架颗粒间孔隙大, 土体微观结构具孔隙絮状—片状结构 (见图 5), 吸水能力强, 过饱和状; 刀切黏滞感强烈, 切面稍光滑, 摇振反应强烈, 韧性中等; 风干后土样呈浅灰—灰白色, 手捻易碎, 干强度低, 手感重量极轻, 手中惦似超轻质干燥木材; 下段土层具明显的页状层理, 层理面分布白色钙质菌丝粉, 状似页岩 (见图 3)。原状土样直立性好, 呈长柱状, 但在手中摇晃, 表面有明显返浆现象, 偶见化成一滩泥浆, 重塑土揉捏难以恢复成团块, 说明原状土具有一定的结构强度, 易受扰动致结构破坏, 引发强度明显降低。



图 5 超轻质火山灰软黏土絮状结构

2.2 土的颗粒级配特征

据现场采用标准贯入试验贯入器芯样选取不同深度 11 件试样, 采用滴液管法^[5]进行室内颗粒分析和烧失量试验, 试验成果数据统计见表 3。由上表可以看出, 颗粒组成以小于 0.005 mm 黏粒为主, 占比超 60%; 其次为粉粒 (0.005 ~ 0.075 mm), 占比约 35% 左右, 含极少量砂粒; 土烧失量占比 15% ~ 20%, 表明该黏土有机质含量高, 与 X 荧光半定量全分析成果中总含碳量高度吻合。

表 3 超轻质火山灰软黏土颗粒分析数据统计表

统计项目	含量/%					烧失量 W_d /%
	2 ~ 0.5 mm	0.5 ~ 0.25 mm	0.25 ~ 0.075 mm	0.075 ~ 0.005 mm	<0.005 mm	
含量	0.0 ~ 1.8	0.5 ~ 2.1	1.0 ~ 2.8	34.0 ~ 35.9	60.7 ~ 62.6	14.9 ~ 23.3
平均	0.9	1.2	1.8	34.6	61.5	19.8

2.3 超轻质火山灰软黏土物理性质及分类

选取 116 份土样进行室内物理性质试验, 试验

数据统计表明,该土具典型的超高含水率($w > 150\%$)、超大孔隙比($e > 4$)、超高液限($w_L > 90\%$)、超轻($\rho_d < 0.60 \text{ g/cm}^3$)特性;液性指数 $I_L = 1.14 \sim 9.83$, $\bar{I}_L = 3.00 > 1$, 应为流塑状态^[6];但现场钻探采取原状土样可直立,手触呈现软塑—可塑状态,室内试验指标与现场观察不吻合;试验成果统计数据列表 4。

表 4 土室内物理性质试验数据统计成果表

数据	w/%	$\rho/(g \cdot cm^{-3})$	$\rho_d/(g \cdot cm^{-3})$	e	w _L /%	w _p /%	I _p /%	I _L /%
最大值	256.8	1.90	0.88	7.23	158.8	122.3	57.9	9.8
最小值	98.7	1.12	0.31	2.14	49.1	18.2	9.5	1.1
平均值	156.6	1.30	0.55	4.32	96.5	63.3	33.2	3.0

该土粒径小于 0.075 mm 的颗粒质量大于 50%,以小于 0.005 mm 黏粒为主,质量占比超 60%,按《土的工程分类标准》(GB/T 50145—2007)应属细粒土;因 $I_p > 20$, $w_L > 50\%$ 为高液限黏土,有机质含量 $> 10\%$ 为有机土,综合定名为有机质高液限黏土(OCH)^[7]。

该土在海湾泻湖静水环境沉积,天然含水量大于液限,天然孔隙比 $e_0 > 1.5$ 为淤泥;有机质含量 14.9 ~ 23.3%,按《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011)应为泥炭质土^[6]。

该泥炭质土沉积时代为第四纪晚更新世,为老沉积土^[8]。因其重度异常低,干重度 $\gamma_d = 3.1 \sim 8.8 \text{ kN/m}^3$,平均干重度 5.5 kN/m^3 ,仅为水重度的 1/2,是一种较特殊岩土,为全面反映该土层性质,综合定名为超轻质火山灰软黏土。

3 超轻质火山灰软黏土工程特性指标

本文研究对象为晚更新世沉积,非新近沉积土,但其属静水环境沉积、富含有机质的淤泥类土。同时,由于其特殊的火山灰物料来源和独特的沉积环境,造就了其观感上具有较好的强度,却具有比一般软土更差的工程性能,工程建设时存在极大的安全风险。结合工程勘察原位测试标准贯入试验和波速测试、室内土工试验成果,对其力学特性进行以下阐述。

3.1 标准贯入试验

选取现场 50 多个钻孔标准贯入试验数据,剔除离散性较大数据,统计结果见表 5。

表 5 标准贯入试验成果实测击数

样本数	最大值/击	最小值/击	平均值/击	标准差	变异系数
280	16	2	5.9	2.16	0.414

土层实测标准贯入试验锤击数普遍分布 4 ~ 10 击范围,局部个别数据可能受试验环境外因和操作影响,偶有超过 10 击数据,标准贯入试验锤击数平均

值(\bar{N})在 6 击左右,相比沿海淤泥类土击数明显偏高,印证了其原状样观感强度高,与可塑状态黏性土标贯击数吻合^[9]。依据标准贯入试验数据分析离散性判断,其与一般的淤泥或泥炭质土有所不同,土质总体均匀性较差。

3.2 压缩性

据近 200 件土样室内标准固结试验数据统计成果(见表 6),压缩系数 $a_{1-2} \leq 0.50 \text{ MPa}^{-1}$ 占比 5.7%, $a_{1-2} > 0.50 \text{ MPa}^{-1}$ 占比 94.3,平均值 3.03 MPa^{-1} 远大于高压缩界线 0.50 MPa^{-1} ,表明该土具超高的压缩性。但其压缩模量 E_{s1-2} 平均值 2.39 MPa 与压缩系数数据之间存在一定的偏离一致性,其原因值得进一步深入研究。

表 6 标准固结试验压缩指标统计表

数据统计	a_{1-2}/MPa^{-1}	E_{s1-2}/MPa
最大值	6.63	3.69
最小值	0.22	1.21
平均值	3.03	2.39

3.3 剪切波速

研究选取 9 个软黏土厚度大于 20 m 钻孔,采用孔内激振方式,以竖向测点间距 1 m 由下至上进行单孔剪切波速测试,实测单点波速值区间范围 139 ~ 295 m/s,用厚度加权平均法计算各孔剪切波速当量值统计数据见表 7。

表 7 超轻质火山灰软黏土单孔剪切波速统计表

钻孔剪切波速当量值/($m \cdot s^{-1}$)			标准差	变异系数
最大值	最小值	平均值		
243.5	231.1	238.6	3.886	0.016

该土层平均剪切波速为 238.6 m/s,按《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010,2016 年版)属中软土,与室内土工试验液性指数间呈现明显不匹配,但其现场表现状态相近,分析室内试验成果除受取样、运输、操作等对土样扰动外在不确定因素影响,主要因其具有一定原生结构强度所致。

3.4 抗剪强度

现场工程钻探采用薄壁取土器采取 I 级土试样分别进行了三轴剪切试验(不排水不固结 UU、固结不排水 CU)及直接快剪试验,试验数据统计见表 8。试验结果显示该原状土强度显著高于一般软土,表明其结构强度作用的存在。

3.5 灵敏度和触变性

现场采取 I 级土试样在室内按软土进行了原状

土和重塑土的无侧限抗压强度试验,并计算其灵敏度,从试验数据分析原状土强度(q_u)较高,受扰动后强度急剧降低,重塑土(q_u')强度仅剩不足原土的1/4,平均灵敏度4.55,为高灵敏土,试验数据统计见表9。究其原因应是土体受扰动导致原生结构破坏,强度大幅度减弱所致。在地震作用下,该类土体极易发生触变,强度瞬时丧失而发生严重的震陷,危害工程稳定性。

表8 土抗剪强度指标统计表

统计指标	UU		CU(有效应力)		直接快剪	
	c_{UU}/kPa	$\varphi_{UU}/(^{\circ})$	c_{CU}'/kPa	$\varphi_{CU}'/(^{\circ})$	c/kPa	$\varphi/(^{\circ})$
最大值	40.23	1.91	84.90	36.50	40.00	13.51
最小值	21.69	1.22	23.90	8.20	15.19	3.40
平均值	30.19	1.49	46.53	21.37	23.36	6.82
标准值	25.74	1.28	28.12	13.66	21.60	5.48
样本数	10	10	6	6	26	26

表9 无侧限抗压强度及灵敏度统计表

指标	最小值/kPa	最大值/kPa	平均值/kPa	标准差	标准值
原状土 q_u/kPa	46.8	77.3	55.95	9.5	50.7
重塑土 q_u/kPa	16.2	19.5	17.98	1.18	17.33
灵敏度 S_i	4.0	5.4	4.55		

3.6 固结状态

依据室内12件土样压缩试验 $e-lgp$ 曲线,利用卡萨格兰德经验作图法求出先期固结压力 $p_c(kPa)$,同时计算出取样位置上覆土层自重压力 $p_0(kPa)$,利用二者比值计算土的超固结比OCR,经数理统计平均值为 $0.62 < 1$,相关统计数据见表10。

表10 超固结比统计表

数据统计	最小值	最大值	平均值	固结状态
$OCR=p_c/p_0$	0.41	0.89	0.62	欠固结

上表数据表明超轻质火山灰软黏土处于严重欠固结状态,自然状态在自重压力下即会产生地面沉降,进行工程建设时,未经处理不宜直接作为建筑物地基持力层,作为下卧层时也应充分考虑其较长时间固结沉降变形的不利影响,处理不当将会出现工程风险。

4 结论及建议

通过现场原位测试和采取土试样进行室内试验、

测试、分析成果,结合区域地质沉积环境条件分析,得出如下结论:

(1)海口地区沉积的超轻质火山灰软黏土,属晚更新世静水环境淤积而成,其典型特征是超低密度($\rho_d < 1 g/cm^3$)、超大孔隙比、超高压缩性、高灵敏度、欠固结、易触变。

(2)海口超轻质火山灰软黏土各项物理指标及沉积环境与软土相符,但其原位测试和室内力学试验指标明显优于普通软土,且野外现场鉴别多呈软—可塑状,极易出现误判。分析其应为火山灰含较多胶质成分在特殊环境下沉积,具有一定原生结构强度,但当土体受扰动结构破坏,其强度急剧降低,灵敏度极高特性,对工程建设影响不容忽视。

(3)野外鉴别和原位测试与室内试验各项物理力学指标多处存在明显差异,除土体自身特性决定外,不排除受取样质量、试验水平影响,建议勘察、设计工作中不选用单一指标,应采用多种勘探及原位测试手段,加强综合分析研究。

(4)鉴于其独特物理力学性质,建设工程施工后沉降时间长,变形量大,未经处理不应直接将其作为建(构)筑物地基持力层,有条件时应进行大型现场原位试验,查清超轻质火山灰软黏土工程特性,制定相应岩土工程评价标准指导工程实践。

参考文献

- [1] 顾宝和. 岩土工程典型案例述评[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- [2] 李建忠. 真空堆载联合预压法加固码头堆场火山灰软基效果分析[J]. 水运工程, 2023, 608(3): 165-172.
- [3] 顾巨红, 宁峥嵘, 刘 瑜. 真空预压法处理火山灰质淤泥试验研究与应用[J]. 施工技术, 2018, 47(24): 125-129.
- [4] 王军桥. 印度尼西亚万隆地区火山灰沉积软土工程地质特征研究[J]. 铁道勘察, 2017, 43(6): 50-52.
- [5] GB 50123—2019 土工试验方法标准[S].
- [6] GB 50007—2011 建筑地基基础设计规范[S].
- [7] GB/T 50145—2007 土的工程分类标准[S].
- [8] GB 50021—2001 岩土工程勘察规范[S].
- [9] 化建新, 郑建国. 工程地质手册(第五版)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.

收稿日期: 2023-08-15