

# 基于多元统计分析的高原山区机场粉质黏土 物理力学特性分析

孙文超<sup>1</sup>, 郭波<sup>2</sup>, 汪志刚<sup>2</sup>, 覃羨安<sup>2</sup>, 李浩<sup>2</sup>, 刘魁<sup>2</sup>

1. 云南省交通规划设计研究院股份有限公司, 昆明 650041;

2. 中国电建集团昆明勘测设计研究院有限公司, 昆明 650051

**摘要:** 高原山区粉质黏土分布较广泛, 其物理力学性质对于工程设计和施工具有显著影响。通过统计分析、相关性分析和主成分分析等技术手段, 对景迈机场区内粉质黏土的物理力学性质进行了深入研究。结果表明, 场区粉质黏土的力学指标比物理指标离散和变异程度更大, 且两者均与土层深度无明显关系。重力密度与天然孔隙比、液限、塑限、塑性指数和压缩系数之间有较强的负相关关系, 天然含水量则分别与天然孔隙比、液限、塑限、塑性指数和压缩系数之间有较强的正相关关系。物理性质可由天然含水量、天然孔隙比、重力密度、液限和塑限作为代表性的判据, 力学性质可由压缩系数、黏聚力和压缩模量进行初步的判定。其中, 粉质黏土天然孔隙比、液限、塑限、液性指数、塑性指数、压缩系数和压缩模量可通过重力密度和天然含水量进行估测和计算。研究成果可为区内粉质黏土物理力学指标选取和计算提供科学依据和技术指导, 对于机场工程设计和施工具有重要意义。

**关键词:** 高原山区; 粉质黏土; 物理力学特性; 多元统计分析

**中图分类号:** P642; P642.15 **文献标识码:** A

## Analysis of Physical and Mechanical Properties of Silty Clay in Plateau Mountain Airport Areas Based on Multivariate Statistical Analysis

SUN Wenchao<sup>1</sup>, GUO Bo<sup>2</sup>, WANG Zhigang<sup>2</sup>, QIN Xianan<sup>2</sup>, LI Hao<sup>2</sup>, LIU Kui<sup>2</sup>

1. Yunnan Provincial Transportation Planning and Design Research Institute Co., Ltd, Kunming 650041, China;

2. Kunming Engineering Corporation Limited, Power China, Kunming 650051, China

**Abstract:** Silty clay in plateau mountain areas is widely distributed, and its physical and mechanical properties have a significant impact on engineering design and construction. This study thoroughly investigates the physical and mechanical properties of silty clay in the Jingmai Airport area via such technical methods as statistical analysis, correlation analysis and principal component analysis. The results show that the mechanical indexes of the silty clay in the area have a greater degree of dispersion and variation than the physical indexes, and neither of which has a clear relationship with the soil layer depth. There is a strong

收稿日期: 2024-06-30 改回日期: 2024-09-03

基金项目: 公路弃渣场失稳灾害评估及防治关键技术研究与应用示范(YCIC-YF-2022-9)

第一作者简介: 孙文超(1988—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向: 岩土工程勘察、地质灾害防治与治理。E-mail: sunwenchao\_2007@126.com

通讯作者: 覃羨安(1977—), 男, 硕士, 正高级工程师, 研究方向: 岩土工程。E-mail: 312324108@qq.com

引文格式: 孙文超, 郭波, 汪志刚, 等. 基于多元统计分析的高原山区机场粉质黏土物理力学特性分析[J]. 地质灾害与环境保护, 2025, 36(1): 54-60.

SUN Wenchao, GUO Bo, WANG Zhigang, et al. Analysis of physical and mechanical properties of silty clay in plateau mountain airport areas based on multivariate statistical analysis[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2025, 36(1): 54-60.

negative correlation between the gravity density and the natural porosity, liquid limit, plastic limit, plasticity index and compression coefficient, while the natural water content has a strong positive correlation with the natural porosity, liquid limit, plastic limit, plasticity index and compression coefficient respectively. Natural water content, natural porosity, gravity density, liquid limit and plastic limit can be used for physical properties as representative criteria, and the mechanical properties can be preliminarily determined by the compression coefficient, cohesion and compression modulus. Among them, the natural porosity, liquid limit, plastic limit, liquidity index, plasticity index, compression coefficient and compression modulus of silty clay can be estimated and calculated by gravity density and natural water content. The research results can be used as a scientific basis and technical guidance for the selection and calculation of the physical and mechanical indexes of silty clay in the area, which is of great significance to the engineering design and construction of airports.

**Key words:** Plateau area; Silty clay; Physical and mechanical properties; Multivariate statistical analysis

## 0 引言

土体的物理力学性质是影响工程设计和施工的关键因素之一,对于确保工程的安全性、可靠性和可持续性具有重要作用。然而,不同地区土体的应力历史条件和演化沉积环境不同,相同类型土层的物理力学性质往往也表现出较大的差异<sup>[1, 2]</sup>,故基于有限的试验数据往往很难描述土体整体的物理力学特征<sup>[3]</sup>。此外,在实际工程建设过程中,需通过大量的原位试验和室内试验对土体物理力学指标进行测定,耗费大量时间和经济成本。故基于现有物理力学指标进行统计分析,揭示区域土体物理力学指标演变规律,阐释土体性质的规律和差异,对于发展经济、绿色工程施工和工后安全评价具有重要意义<sup>[4]</sup>。

澜沧景迈机场为4C级支线机场,作为普洱通向云南乃至外界的又一条“空中走廊”,对推动普洱市澜沧、孟连、西盟“边三县”旅游资源的开发和利用,促进民族团结、扶贫攻坚、完善当地综合交通体系具有非常重要的作用。工程区广泛分布的粉质黏土是一种具有细粒度和较高可塑性的黏土类型,其物理力学性质对机场的建设和运营具有重要影响。此外,场区覆盖层主要由人工填土和粉质黏土组成,上部人工填土厚度变化较大,下伏基岩面起伏较大,石芽、溶沟等强烈发育,致使中部粉质黏土承受不均匀的附加荷载,进而使得场区内粉质黏土物理力学性质有较大差异。正确认识区内粉质黏土的物理力学性质特征,是把控场区地基工程的稳定性、承载能力和变形特性的必要条件。

直至目前,学者围绕土体物理力学性质分析与

预测问题进行了大量研究<sup>[5-9]</sup>。Guo, et al. 研究了温度对粉质黏土力学参数的影响,结果表明粉质黏土强度参数随温度降低而显著增大<sup>[10]</sup>。白建文等利用多元统计分析方法对北戴河新区粉质黏土物理力学性质进行了统计分析,建立了回归方程模型,概括描述了场区粉质黏土的工程性质<sup>[11]</sup>。余燧等通过 Pearson 相关性分析讨论了宜阳粉质黏土含水率与其他物理力学指标的相关性,并建立经验关系式,为宜阳地区类似工程建设提供科学参考<sup>[12]</sup>。魏星灿等基于物性试验、静力和动力试验分析了冷勒水电站坝基粉质黏土物理力学性质,提出特殊土体超固结粉质黏土的物理力学指标的科学建议值<sup>[13]</sup>。杨少帅等选择乐山市不同地质背景和成因环境的粉质黏土作为研究对象,得到了不同类粉质黏土物理力学参数的建议取值范围<sup>[2]</sup>。以往的研究表明,粉质黏土的物理力学性质受多种因素的影响,包括颗粒结构、含水量、固结状态和应力历史等。然而,由于区域特性大,土性差异显著,已有成果难以科学指导景迈机场区岩土工程设计施工。因此,深入研究澜沧景迈机场区粉质黏土的物理力学性质,对于保障机场地基工程的安全可靠性和长期稳定性具有积极意义。

本文通过相关性分析和主成分分析等技术手段对澜沧景迈机场区内粉质黏土物理力学性质进行研究,深度阐释景迈机场粉质黏土的物理力学规律,为工程设计和施工提供科学依据和技术支持,同时也对区域内类似的工程设计与施工提供参考和依据。

## 1 研究区工程地质概况

澜沧景迈机场位于云南省西南部普洱市澜沧拉

澜沧拉祜族自治县东回镇,场址及周围区域内海拔约1 208~1 536 m(图1)。机场距县城公路约30 km,距普洱市区约203 km,机场周边建有机场连接线、思芒线(219国道)、J73县道等,交通较为便利。

机场区域为构造剥蚀及岩溶溶蚀构造中山地貌单元,地表地层主要为新生界第四系人工填土( $Q_4^{ml}$ )杂填土、素填土,其下为第四系坡洪积层( $Q_4^{dl+pl}$ )粉质黏土。下伏基岩以古生界石炭系中上

统( $C_{2-3}$ )白云质灰岩、灰质白云岩夹灰岩的碳酸盐岩、石炭系下统依柳组( $C_{1y}$ )的蚀变凝灰岩及火山角砾凝灰岩夹灰岩透镜体为主。场区内覆盖层上部人工填土呈稍密-中密状,成分主要以黏性土、碎石为主,少量块石,回填时间约7 a,回填时经机械碾压,尚未完全固结,厚度0.50~19.5 m;下部粉质黏土层顶埋深随地形起伏较大,土层厚度约为0.5~22 m,呈可塑-硬塑状。

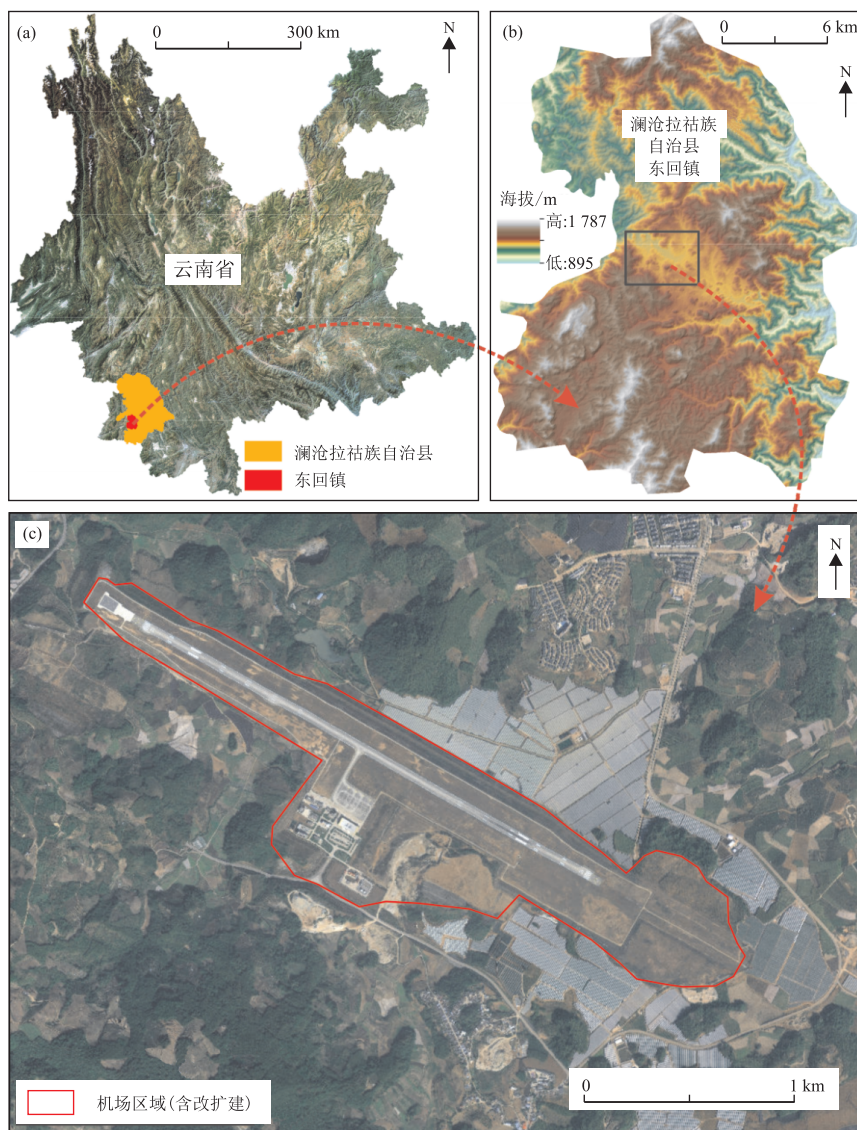


图1 澜沧景迈机场地理位置图

## 2 粉质黏土物理力学特性分析

### 2.1 研究对象及其物理力学指标

本研究选取景迈机场区144组不同深度处的粉质黏土试验数据为研究对象,探析机场区粉质黏土的物理力学特征。选取样本在水平和垂直方向基本覆盖景迈机场区,可表征区内粉质黏土的现实分布情况。所选取物理力学指标包括:采样深度、重力密

度、土粒比重、天然含水量、天然孔隙比、饱和度、液限、塑限、液性指数、塑性指数、黏聚力、内摩擦角、压缩系数、压缩模量,涵盖基础的物理力学指标。

### 2.2 粉质黏土物理力学特性

通过对景迈机场区144组粉质黏土的物理力学试验结果进行筛选、剔除异常值后统计分析,结果如表1所示。粉质黏土的采样深度介于5.80~38.00 m之间,平均采样深度为21.79 m,标准偏差和变异

系数分别为 7.31 和 33.53%。重力密度、土粒比重、饱和度和塑性指数的最大值和最小值较为接近,标准偏差分别为 0.82、0.02、2.91 和 1.18,变异系数分别为 4.52%、0.91%、3.04%和 8.04%,数据离散性和变异性较小,在岩土工程设计中可定义为常量<sup>[14]</sup>。

表 1 景迈机场区粉质黏土物理力学指标统计表

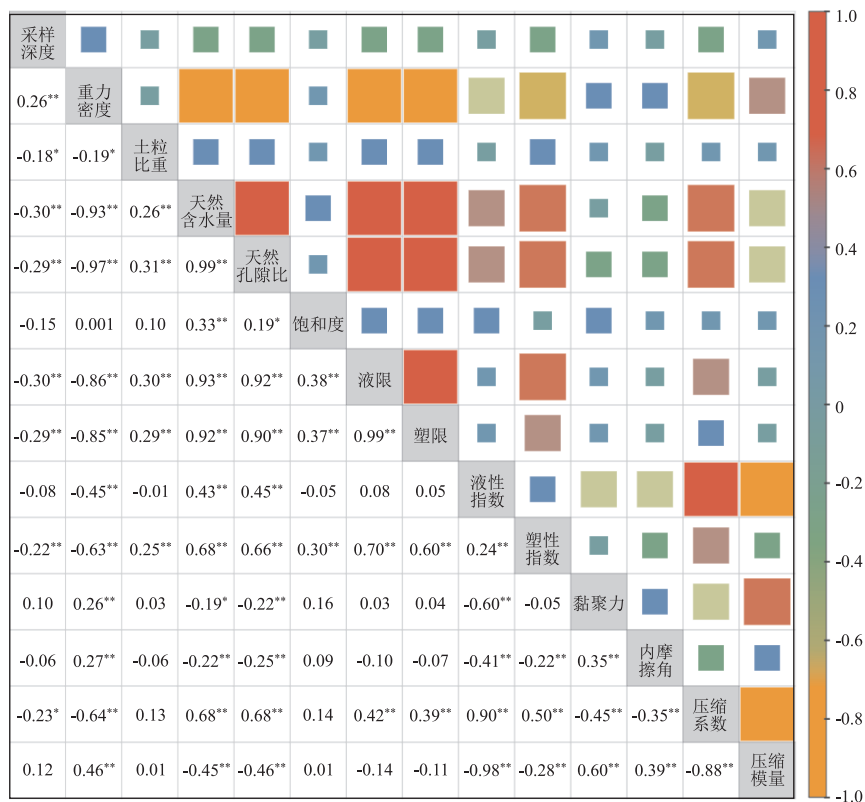
指标	最小值	最大值	平均值	标准偏差	变异系数/%
采样深度 $\mu/m$	5.80	38.00	21.79	7.31	33.53
重力密度 $\gamma/kN/m^3$	16.40	20.50	18.05	0.82	4.52
土粒比重 $G_s$	2.63	2.74	2.70	0.02	0.91
天然含水量 $\omega/\%$	20.80	58.40	38.28	7.48	19.54
天然孔隙比 $e$	0.56	1.58	1.08	0.20	18.96
饱和度 $S_r/\%$	85.60	98.90	95.85	2.91	3.04
液限 $\omega_L/\%$	27	66.30	45.96	7.17	15.61
塑限 $\omega_p/\%$	15.70	50.80	31.30	6.41	20.46
液性指数 $I_L$	0.07	0.89	0.47	0.18	38.68
塑性指数 $I_P$	11.30	19.50	14.66	1.18	8.04
黏聚力 $C/kPa$	12.80	57.20	30.96	10.38	33.54
内摩擦角 $\varphi/^\circ$	3.10	49.20	12.63	6.86	54.30
压缩系数 $\alpha_{1-2}/MPa^{-1}$	0.19	0.92	0.40	0.14	35.14
压缩模量 $E_s/MPa$	2.69	9.51	5.56	1.35	24.31

整体看来,除了液性指数外,景迈机场区粉质黏土的物理指标相对力学指标来说离散和变异程度较低。其原因为土样采集和运输过程中,土体物理指

标相对力学指标受试样扰动影响较小。并且,物理指标的相关测试试验操作简单,试验数据精度较高,而土体变形指标和强度指标的相关试验较为复杂繁琐,对试验人员有着较高的要求,试验数据产生误差的可能性较大。因此,在岩土工程设计和施工中合理确定粉质黏土力学性质难度较大。对于液性指数  $I_L$  而言,其值介于 0.07~0.89 之间,变异系数为 38.68%,故区内粉质黏土液性指数可能受多种因素的差异性影响。

### 2.3 相关性分析

土体的物理力学指标综合反映着土体的工程地质特性。基于现有的土工试验数据进行相关性分析,对于揭示研究区粉质黏土的物理力学指标演化规律具有重要意义。目前,许多学者在黏土的物理力学性质方面研究主要体现在:黏土的物理力学性质指标的最佳数学模型是线性关系模型<sup>[15]</sup>,不同区域黏土的力学指标空间变异性较大,但物理指标变异较小, $e-\omega$ 、 $\omega_L-\omega$ 、 $\omega_L-e$ 、 $\alpha_{1-2}-e$ 关系具有线性相关性<sup>[16]</sup>,通过建立岩土体各物理力学指标间经验公式,可为同一区域内岩土参数选取提供参考。本研究中,通过数理统计中相关性分析方法对粉质黏土物理力学参数间相互关系进行探析,结果如图 2 所示(方块大小代表相关性系数绝对值的大小)。



注: \*\* 表示在 0.01 级别(双尾),相关性显著; \* 表示在 0.05 级别(双尾)相关性显著

图 2 景迈机场粉质黏土物理力学指标相关性分析图

研究区上覆土层为2014年机场建设过程中的人工填土,下伏粉质黏土层受上部填土荷载作用周期短,场区粉质黏土物理力学指标受上部荷载作用变异程度低,故采样深度与物理力学指标之间相关性均较低(参见图2),可认为场区粉质黏土的物理力学性质与土层深度无关。重力密度与天然孔隙比、液限、塑限、塑性指数和压缩系数间相关性系数分别为-0.97、-0.86、-0.85、-0.63和-0.64,均呈显著的负相关关系。土粒比重与其他物理力学指标之间的相关性较低,这可能是受到土粒比重的离散型较差的影响(土粒比重变异系数仅为0.91%)。天然含水量与天然孔隙比、液限、塑限、塑性指数和压缩系数间有显著的相关关系,且均表现正相关关系,相关性系数分别为0.99、0.93、0.92、0.68和0.68。除此之外,液限和塑限、液限和塑性指数、液性指数和压缩系数、黏聚力和压缩模量之间具有较强的正相关性;液性指数和压缩模量、压缩系数和压缩模量之间具有显著的负相关性。

#### 2.4 主成分分析

据《岩土工程勘察规范》<sup>[17]</sup>,结合前述数据分析,选择重力密度、土粒比重、天然含水量、天然孔隙比、饱和度、液限、塑限、黏聚力、内摩擦角、压缩系数和压缩模量等物理力学指标进行主成分分析,定量判定各指标对于场区粉质黏土工程性质的重要性,以指导工程实践。通过对输入数据进行KMO和Bartlett检验,KMO检验值为0.683,Bartlett检验显著性为0,故输入数据满足主成分分析的基本要求。根据主成分分析结果,研究区粉质黏土输入物理力学参数共被提取了2个主成分,第一主成分和第二主成分特征值分别为5.64和2.20,累计贡献率分别为51.24%和71.26%(图3)。

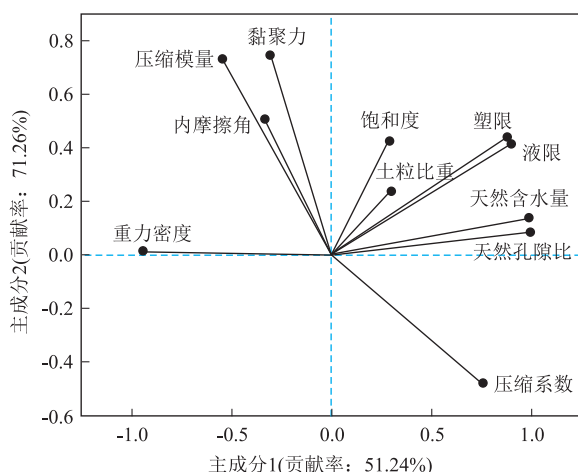


图3 景迈机场粉质黏土物理力学指标主成分载荷关系图

如图3所示,在主成分1中,天然含水量、天然孔隙比、液限、塑限和压缩系数均具有较大的正值载荷,重力密度具有较大的负值载荷;在主成分2中,黏聚力和压缩模量分别具有0.75和0.73的正值载荷值。由此可知,场区粉质黏土的物理性质可通过天然含水量、天然孔隙比、重力密度、液限和塑限做初步判定,且结合其余关联物理指标如液性指数和塑性指数等,即可表征场区粉质黏土的物理状态 and 可塑特性。在力学性质指标中,压缩系数、黏聚力和压缩模量相对其他力学性质指标具有较高的载荷值,可见变形指标和强度指标在场区粉质黏土的力学性质中均有较高表现,且力学性质可由压缩系数、黏聚力和压缩模量进行初步的判定。

#### 2.5 回归分析

在土体物理力学性质指标中,重力密度、土粒比重和天然含水量作为最基础的土体物理性质表征指标,可通过较为简单快捷的室内试验获取,且数据精度相对较高。而其余物理力学指标一般需要通过复杂的室内试验,经历较长的试验周期获得,且数据精度受多种主观和客观因素影响,不确定性较大。据表1可知土粒比重标准偏差为0.02,变异系数为0.91%,离散型极低;据图2可知,土粒比重与其他物理力学指标间相关系数较小,相关性较弱。因此,土粒比重无法反映出区内物理力学指标的变异规律。

基于上述,考虑数据易测易得和一般数据质量特征等,通过归一化消除量纲后,选择将重力密度和天然含水量作为自变量。综合相关性分析可知,依据场区粉质黏土重力密度和天然含水量,可对天然孔隙比、液限、塑限、塑性指数和压缩系数指标进行相对可靠的预估(参见图2)。

为更深度量化分析区内粉质黏土物理力学指标间相互关系,以重力密度和天然含水量作为自变量,分别对天然孔隙比、液限、塑限、塑性指数和压缩系数进行一元和二元线性拟合,结果见表2所示。重力密度与天然孔隙比、液限和塑限的线性拟合关系式确定性系数 $R^2$ 分别为0.941、0.737、0.715。因此,由重力密度指标值可以有效地预估场区粉质黏土的天然孔隙比、液限和塑限的指标值。通过天然含水量作为自变量的一元线性拟合可知,由天然含水量也可有效地估算天然孔隙比、液限和塑限,且拟合关系式的确定性系数更大,分别为0.975、0.873和0.847,估测的可信度相对利用重力密度估测来说得到提高。此外,当重力密度和天然含水量均作为自变量时,相比两者单独作为自变量,因变量的估

表 2 物理力学指标拟合关系汇总表

自变量	因变量	拟合关系式	R <sup>2</sup>
重力密度 $\gamma$	天然孔隙比 $e$	$e = -0.243 1\gamma + 5.47$	0.941
	液限 $\omega_L$	$\omega_L = -7.549 3\gamma + 182.23$	0.737
	塑限 $\omega_p$	$\omega_p = -6.640 8\gamma + 151.17$	0.715
	塑性指数 $I_P$	$I_P = -0.908 5\gamma + 31.06$	0.395
	压缩系数 $\alpha_{1-2}$	$\alpha_{1-2} = -0.108 3\gamma + 2.36$	0.408
天然含水量 $\omega$	天然孔隙比 $e$	$e = 0.027\omega + 0.05$	0.975
	液限 $\omega_L$	$\omega_L = 0.895 7\omega + 11.67$	0.873
	塑限 $\omega_p$	$\omega_p = 0.788 2\omega + 1.12$	0.847
	塑性指数 $I_P$	$I_P = 0.107 5\omega + 10.54$	0.465
	压缩系数 $\alpha_{1-2}$	$\alpha_{1-2} = 0.012 5\omega - 0.08$	0.465
重力密度 $\gamma$ 天然含水量 $\omega$	天然孔隙比 $e$	$e = -0.093\gamma + 0.017\omega + 2.10$	0.992
	液限 $\omega_L$	$\omega_L = 1.014\gamma + 0.999\omega - 10.59$	0.874
	塑限 $\omega_p$	$\omega_p = 0.912\gamma + 0.881\omega - 18.88$	0.849
	塑性指数 $I_P$	$I_P = 0.103\gamma + 0.118\omega + 8.29$	0.466
	压缩系数 $\alpha_{1-2}$	$\alpha_{1-2} = -0.006 7\gamma + 0.012\omega + 0.07$	0.466

测值可信度最高,天然孔隙比、液限和塑限的拟合确定性系数分别高达 0.992、0.874 和 0.849。

蒋建平等(2007)采用数理统计对长江下游水下粉质黏土工程特性进行研究,结果表明压缩模量、压缩系数与天然孔隙比、天然含水量、天然密度的相关性较好,相关系数达 0.87 以上<sup>[9]</sup>。许旭堂等(2015)对非饱和残积土的含水率( $\omega$ )和干密度( $\rho_d$ )与抗剪强度指标( $c$ 、 $\varphi$ )进行相关分析,结果表明内摩擦角在含水率增大过程中具有非线性衰减的趋势,且集中在一个范围内变化,土体密实度与黏聚力具有线性正相关性<sup>[18]</sup>。唐军平等(2018)采用数理统计分析方法对软土的物理力学指标进行统计分析,揭示了软土的固结指标和强度指标与其他物理指标间的线性相关性较低<sup>[19]</sup>。土体的抗剪强度主要受土体的矿物组成、原(次)生结构、含水率、应力历史等因素影响。因土体物质组成、形成原因及沉积环境不同,研究区粉质黏土塑性指数和压缩系数与重力密度和天然含水量之间的拟合关系式确定性系数较低,估测的可信度较低。因此,研究区粉质黏土塑性指数和压缩系数应受诸多因素共同影响,仅通过重力密度和天然含水量无法对其进行有效的线性估测,但可判断整体变化的趋势。在实际估测计算过程中,可通过液限和塑限估测值作差计算塑性指数,其后可计算液性指数。

当液性指数由估测值计算得出,由图 2 相关性分析可知,场区粉质黏土液性指数与压缩系数和压缩模量呈较强的相关性,而压缩模量又与黏聚力间有较好的正相关关系。故可利用液性指数对压缩系数和压缩模量进行估测,进而通过压缩模量对黏聚力进行估测。如图 4(a)和图 4(b)所示,通过液性指

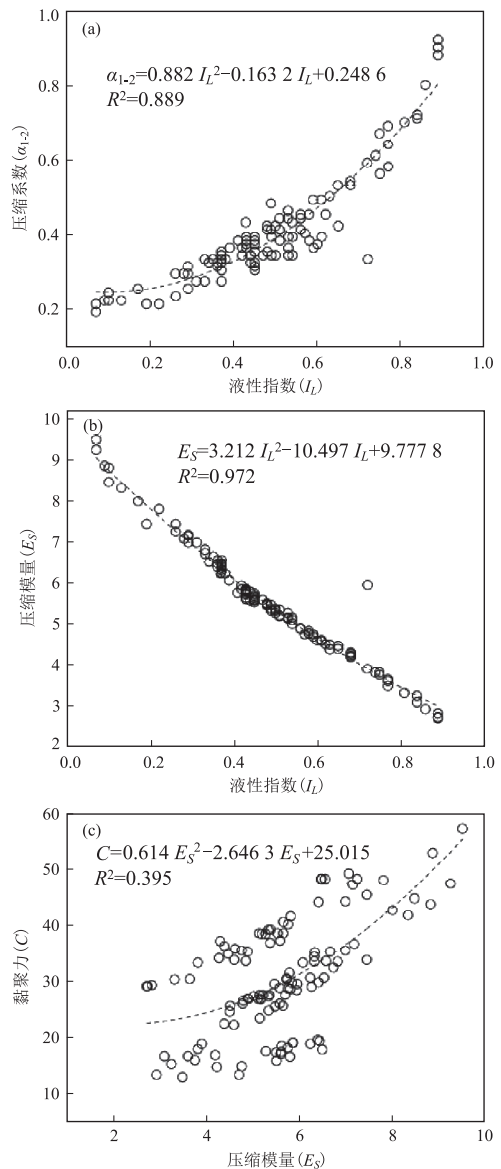


图 4 液性指数与压缩系数、压缩模量黏聚力的双坐标散点图

数和压缩系数的多项式拟合确定性系数达 0.889, 而液性指数估测压缩模量多项式的确定性系数更是高达 0.972, 估测可信度较高。然而, 通过压缩模量对黏聚力进行估测的确定性系数仅为 0.395, 估测效果较差, 仅可通过压缩模量等相关性特征对区内粉质黏土黏聚力进行变化趋势判定, 其指标值需试验确定。

综上所述, 在场区粉质黏土可通过易测易得的重力密度与天然含水量, 对天然孔隙比、液限和塑限进行估测。其后, 可利用液限和塑限对液性指数和塑性指数进行计算。最后, 利用计算的液性指数对力学指标(压缩系数和压缩模量)进行估测。

### 3 结论

本文以景迈机场区粉质黏土为例, 选择粉质黏土土工试验所得物理力学指标为研究对象。综合多元统计分析等技术手段, 洞察土体参数之间的关系, 降低数据维度, 减少信息冗余, 阐释了机场区粉质黏土物理力学特征, 主要结论如下:

(1) 场区粉质黏土的物理指标相对力学指标来说离散和变异程度较低。重力密度、土粒比重、饱和度和塑性指数极差较小, 标准偏差分别为 0.82、0.02、2.91 和 1.18, 变异系数分别为 4.52%、0.91%、3.04% 和 8.04%, 数据离散性和变异性较小, 工程设计中可定义为常量。

(2) 景迈机场区粉质黏土受上覆填土层作用周期较短, 物理力学性质与土层深度无关。重力密度和天然含水量分别与天然孔隙比、液限、塑限、塑性指数和压缩系数之间有较强的负相关和正相关关系。

(3) 景迈机场区粉质黏土的物理性质可由天然含水量、天然孔隙比、重力密度、液限和塑限做初步的判定, 力学性质可由压缩系数、黏聚力和压缩模量进行初步的判定。

(4) 景迈机场区粉质黏土天然孔隙比、液限、塑限、液性指数、塑性指数、压缩系数和压缩模量可通过易测易得的重力密度和天然含水量进行估测和计算, 估测确定性系数大于 0.849。

### 参考文献

- [1] 李刚, 张金利, 杨庆. 不同成因沉积土物理力学指标概率统计分析[J]. 岩土力学, 2017, 38(12): 3565-3572.
- [2] 杨少帅, 冯文凯, 谢春庆, 等. 乐山浅切丘陵区粉质黏土物理力学参数概率分布特征[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(32): 1-7.
- [3] 刘东升, 刘汉龙, 吴越, 等. 岩土材料的基因特征及其测试方法[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2022, 44(4): 1-9.
- [4] 蒋建平, 罗国煜. 苏通大桥地基粉质黏土物性指标相关关系试验研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(6): 1669-1674.
- [5] 阮水芬, 李鹏辉, 王必顺, 等. 基于主成分与聚类分析滇池湖相粉土物理力学参数[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版), 2023, 48(3): 41-52.
- [6] ASGHARI S, SHEYKHZADEH G R, SHAHABI M. Geostatistical analysis of soil mechanical properties in Ardabil plain of Iran[J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2017, 63(12): 27-33.
- [7] LUMB P. The properties of decomposed granite [J]. Géotechnique, 1962, 12(3): 226-243.
- [8] 井彦林, 王梁鑫, 赵文文, 等. 非饱和黄土物理力学参数与导热系数关系的研究[J]. 煤炭工程, 2018, 50(10): 46-49.
- [9] 蒋建平, 罗国煜. 长江下游水下粉质黏土工程特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(S1): 3215-3222.
- [10] GUO Haotian, LIN Yuli, SUN Chao, et al. Effect of temperature on the dynamic parameters of silty clay in a seasonally frozen region[J]. Scientific Reports, 2023, 13(1): 13141.
- [11] 白建文, 冯品基, 杨锐, 等. 北戴河新区粉质黏土物理力学性质研究[J]. 建筑结构, 2021, 51(S2): 1031-1040.
- [12] 余焱, 刘思思, 蒋进, 等. 宜阳粉质黏土含水率 Pearson 分析及相关性研究[J]. 公路, 2020, 65(7): 7-13.
- [13] 魏星灿, 夏万洪, 黄润太. 冶勒水电站坝基超固结粉质黏土物理力学特性[J]. 人民黄河, 2018, 40(3): 126-131.
- [14] 赵孝旗, 周翔, 康怀信, 等. 杭州地区海相软土物理力学指标相关性分析[J]. 路基工程, 2021, (5): 30-34.
- [15] 阙金声, 陈剑平, 石丙飞. 广州大学城软土的工程地质性质统计分析[J]. 煤田地质与勘探, 2007, 35(1): 49-52.
- [16] 张先伟, 孔令伟, 郭爱国, 等. 湛江强结构性黏土的物理力学性质指标及相关性分析[J]. 工程地质学报, 2011, 19(4): 447-454.
- [17] 中华人民共和国建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 岩土工程勘察规范[S]. 2009.
- [18] 许旭堂, 简文彬, 柳侃. 含水率和干密度对残积土抗剪强度参数的影响[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(2): 364-369.
- [19] 唐军平, 何国东, 付旭, 等. 佛山地基软土物理力学指标间的相关性研究[J]. 地下空间与工程学报, 2018, 14(增刊 2): 645-653, 659.