

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2025.02.008

# 太湖隧道湖相沉积软土工程特性研究

吴建<sup>1,2</sup>, 周志芳<sup>2</sup>, 王浩<sup>1</sup>, 陈波<sup>1</sup>, 王锦国<sup>2</sup>

(1. 上海勘测设计研究院有限公司, 上海 200434; 2. 河海大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 210098)

**摘要:** 为研究太湖湖底沉积软土的工程特性和土体参数分布规律, 收集了太湖隧道沿线湖底软土的大量试验数据, 系统分析了软土物理力学参数的取值范围、变异性、概率分布模型以及空间分布规律, 并探讨了各土层物理力学参数之间的相关性。结果表明: 太湖湖底软土物理力学参数变异系数高, 在空间分布上无明显函数变化规律; 塑限和液限满足正态分布, 密度和干密度近似正态分布, 其他参数不符合正态分布; 与强度参数最显著相关的物理力学参数包括天然含水率、天然孔隙比、干密度, 呈指数或幂函数关系; 对比压缩模量, 压缩系数和天然含水率、天然孔隙比、干密度之间具有更好的相关性; 各土层中黏土变形参数与强度参数间的相关系数最大, 淤泥质土与粉质黏土次之, 粉土最小。

**关键词:** 软土; 物理力学参数; 抗剪强度; 工程特性; 太湖隧道

**中图分类号:** U459.5; U452.11 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2025)02-0063-08

## Study on engineering properties of lacustrine soft soils along the Taihu tunnel

WU Jian<sup>1,2</sup>, ZHOU Zhifang<sup>2</sup>, WANG Hao<sup>1</sup>, CHEN Bo<sup>1</sup>, WANG Jinguo<sup>2</sup>

(1. Shanghai Investigation, Design & Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200434, China;

2. School of Earth Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** In order to explore the engineering properties and parameter distribution characteristics of lakebed sedimentary soft soils of Taihu, a large amount of experimental data of lakebed soft soils along the Taihu tunnel was collected. The value range, variability, probability distribution model, and spatial distribution pattern of physical and mechanical parameters were systematically analyzed. Then, the correlations between soil property indexes of various soil layers were explored. The results show that the physical and mechanical parameters of lakebed soft soils have high variation coefficients and no obvious functional variation pattern in spatial distribution. The plastic limit and liquid limit satisfy a normal distribution, the density and dry density approximately follow a normal distribution, while other parameters do not conform to a normal distribution. The most significant physical indexes related to the intensity parameter of soft soil are natural water content, natural void ratio and dry density, respectively, which have exponential or power functions in relation to those mechanical indexes. Compared to compression modulus, the coefficient of compression has a better correlation with natural water content, natural void ratio, and dry density. The correlation coefficients between intensity parameters and deformation parameters of clay are the largest, followed by mucky soils and silty clay, and silt has the smallest correlation coefficients.

**Key words:** soft soil; physical and mechanical parameter; shear strength; engineering characteristic; Taihu tunnel

软土因其高含水率、高灵敏度、高压缩性、低密度、低强度等特点<sup>[1]</sup>, 对隧道开挖<sup>[2]</sup>、地面沉降<sup>[3]</sup>及桩基稳定性<sup>[4]</sup>均有不利影响。稳定性计算和变形控制需要准确的软土体本构模型和物理力学参数, 这些土体参数必须符合软土的实际工程特性。因此, 软土的工程特性统计分析及其物理力学参数之间相关性研究对于软土工程的参数取值和施工安全具有重要意义。

湖相新近沉积软土是软土工程中一种常见的软土, 广泛分布于全国各地的湖泊及河流覆盖古牛轭湖区域<sup>[5-9]</sup>, 水利、水运、交通工程多会遇到软土, 研究其工程特性具有重要意义。刘嘉正<sup>[5]</sup>应用随机场理论对里下河湖相软土的土性参数变异性进行了概率统计分析。甘建军等<sup>[6]</sup>统计分析了鄱阳湖区深厚湖相沉积软土的工程特性。刘海军等<sup>[7]</sup>利用机器学习算法和数理统计方法深入研究了滇池湖相粉土的工程性质。

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(41572209); 三峡上海院科标业项目(2024JC(831)-001)

**作者简介:** 吴建(1994—), 男, 工程师, 博士, 主要从事水文地质与隧道工程研究。E-mail: wu\_jian7@ctg.com.cn

**引用本文:** 吴建, 周志芳, 王浩, 等. 太湖隧道湖相沉积软土工程特性研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2025, 53(2): 63-70.

WU Jian, ZHOU Zhifang, WANG Hao, et al. Study on engineering properties of lacustrine soft soils along the Taihu tunnel[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2025, 53(2): 63-70.

裘友强等<sup>[8]</sup>通过收集全国不同区域3000组内陆河湖相软土土工试验数据,给出了内陆河湖相软土土性指标统计特征与竖向变化规律。张继周等<sup>[9]</sup>基于随机场理论、考虑空间趋势分量的土性参数变异性统计方法,统计分析了苏中腹地湖相软土土性参数的变异特性。

针对软土物理力学参数之间的相关性研究,国内外学者取得了大量的成果。李旭昶等<sup>[10]</sup>基于扬州土的室内试验数据,研究了该地区土体的物理力学参数间的相关性。欧阳恒等<sup>[11]</sup>提出福州典型软土的抗剪强度指标与天然含水率、天然孔隙比、液性指数、压缩系数均呈负非线性相关,而与压缩模量呈正线性相关。屈若枫等<sup>[12]</sup>利用数学分析方法,系统地分析了武汉地区深厚淤泥质土物理力学参数及其指标间的相关性。郭林坪等<sup>[13]</sup>阐述了天津滨海新区黏性土孔隙比、含水率、密度等物理指标与强度指标之间的相关性。孙毅力等<sup>[14]</sup>研究了北京区域土的压缩模量与物理指标之间的相关性。

上述研究表明,软土的工程特性呈现明显的区域性和分层性,现有的文献研究主要针对地表沉积软土如沿海海相软土<sup>[1,11,13]</sup>和内陆河湖相软土<sup>[5-9]</sup>,缺乏水下或湖底大面积沉积软土工程特性及其土性指标变化规律的数理分析。此外,不同土层如淤泥质土、粉质黏土、黏土等的物理力学指标间的相关性具有明显的差异,仍需要精细地分类分层研究。

本文基于太湖隧道沿线湖底软土各土层的大量试验数据,系统分析了软土物理力学参数的取值范围、变异性、概率分布模型以及空间分布规律,并探讨了各土层土性指标之间的相关性,以为太湖地区水下工程的土体参数取值提供参考。

## 1 工程概况

太湖隧道是苏锡常南部高速公路的重要节点工程,穿越太湖梅梁湖,对长三角地区的融合发展具有重要的纽带作用,被列入了“2020年交通运输部科技示范工程”。太湖隧道全长10.79 km,横断面总宽43.6 m,其中岸边段长1.41 km,湖中段长9.38 km,是目前国内最长的水下公路隧道,采用由两端岸边向湖中心相向推进的围堰明挖施工。

工程区内广泛分布着深厚第四纪松散堆积层,主要由全新统、上更新统地层组成(图1)。开挖深度范围内地层依次分布为淤泥、淤泥质粉质黏土、淤泥质黏土、粉质黏土、粉土及黏土等,其中淤泥质粉质黏土与淤泥质黏土层厚度大,局部可达几十米,且分布极不均匀,呈交错沉积。粉质黏土层多为灰黑色,互层状分布。粉土层分布连续,厚度一般数米至十几米不等,局部夹粉砂薄层,呈透镜体分布,是区域内主要的微承压含水层。黏土层埋藏深度较深,土质较均。因此,湖底软土具有高度不均匀性、分层差异性、工程性质较差等特点,给太湖地区水下隧道工程的建设与设计带来了前所未有的挑战。

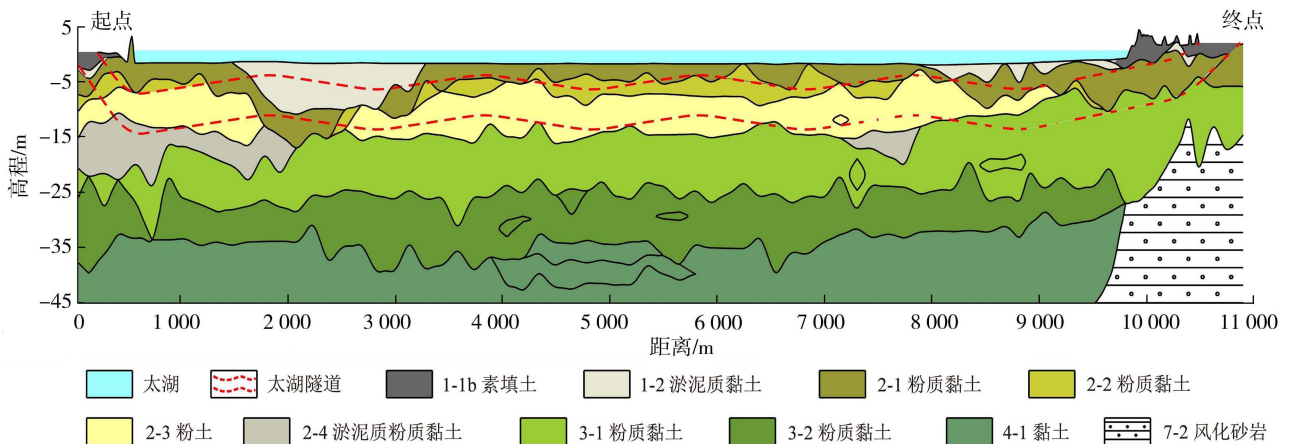


图1 太湖隧道工程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of Taihu tunnel project

## 2 太湖湖底软土工程特性

### 2.1 物理力学参数统计分析

试样取自太湖隧道工程沿线的数百个钻孔,最大埋深可达120 m。土样共计9285个,原状土样,其中淤泥

质土 173 个,粉质黏土 4975 个,粉土 2325 个,黏土 1812 个。试验包括室内常规试验、塑性试验、直剪试验(快剪和固快)、三轴固结不排水试验以及固结试验,获得的物理力学参数主要包括天然含水率( $w$ )、密度( $\rho$ )、干密度( $\rho_d$ )、天然孔隙比( $e$ )、饱和度( $S_r$ )、液限( $w_L$ )、塑限( $w_p$ )、塑性指数( $I_p$ )、液性指数( $I_L$ )、压缩系数( $a_{1-2}$ )、压缩模量( $E_s$ )、黏聚力( $c$ )、内摩擦角( $\varphi$ ),试验条件和操作过程按 JTG 3430—2020《公路土工试验规程》和 GB/T 50123—2019《土工试验方法标准》的相关规定执行。太湖隧道湖底软土物理力学参数统计结果见表 1。

表 1 太湖隧道湖底软土物理力学参数统计

Table 1 Physical and mechanical parameter statistics of lakebed soft soils along the Taihu tunnel

参数	单位	样本数	分布区间	平均值	标准差	变异系数
$w$	%	9283	13.6~86.4	28.92	6.13	0.21
$\rho$	$g/cm^3$	3566	1.5~2.16	1.93	0.08	0.04
$\rho_d$	$g/cm^3$	3566	0.8~1.88	1.51	0.13	0.08
$e$		3553	0.44~3.83	0.82	0.18	0.22
$S_r$	%	3553	45~110	95.12	4.07	0.04
$w_L$	%	8506	19.6~60.5	35.97	5.20	0.14
$w_p$	%	8506	10.6~36.6	21.86	2.44	0.11
$I_p$		7558	4.4~31.6	13.86	3.97	0.27
$I_L$		7558	0.1~2.2	0.60	0.36	0.59
$a_{1-2}$	$MPa^{-1}$	3254	0.06~2.79	0.33	0.20	0.61
$E_s$	MPa	3254	1.07~26.25	6.94	3.23	0.47
$c$ (直剪)	kPa	2197	3.0~51.0	27.18	11.49	0.42
$c$ (三轴剪切)	kPa	67	9.0~49.0	28.78	11.35	0.39
$\varphi$ (直剪)	( $^\circ$ )	2197	1.3~29.5	12.19	6.00	0.49
$\varphi$ (三轴剪切)	( $^\circ$ )	67	0.6~29.3	14.02	7.73	0.55

注:取样深度为 0~97.35 m。

根据试验统计数据,太湖湖底冲湖积相软土具有如下特征:①天然含水率较高,饱和度高,孔隙比较大。天然含水率最大值可达 86.4%,平均值为 28.92%;饱和度均值达到 95.12%;孔隙比最大值为 3.83,平均值为 0.82,对基坑变形及相邻建筑物的沉降影响较大。②液限较高,液性指数、塑性指数较大。软土液限平均值为 35.97%,最大值为 60.5%,液性指数的平均值为 0.60,处于可塑-流塑状态,塑性指数介于 4.4~31.6 之间,均值为 13.86。③压缩性较高。压缩系数的均值为 0.33  $MPa^{-1}$ ,其中淤泥及淤泥质土的均值为 0.80  $MPa^{-1}$ ,呈高度压缩性,而粉质黏土、粉土及黏土压缩系数均值分别为 0.32、0.19、0.35  $MPa^{-1}$ ,呈中低等压缩性。④抗剪强度低。不考虑排水条件下直剪试验和三轴固结不排水试验所得的黏聚力平均值分别为 27.18 kPa 和 28.78 kPa,内摩擦角均值分别为 12.19 $^\circ$ 和 14.02 $^\circ$ 。慢剪排水条件下粉土抗剪强度指标相对较大<sup>[15]</sup>,与黏土有区别,需要根据实际工况选取强度参数。⑤变异系数高。对比里下河潟湖<sup>[5]</sup>软土,太湖湖底软土最显著的特征是其主要物理力学参数(天然含水率、天然孔隙比、饱和度、压缩系数、快剪内摩擦角)变异系数高,离散性强。

## 2.2 软土物理力学参数概率分布规律

为科学评估软土物理力学参数的概率分布规律,利用 Sturges 公式<sup>[1]</sup>进行评估:

$$M = 1 + 3.3 \lg N \quad (1)$$

$$\Delta = (a - b) / M \quad (2)$$

式中: $M$ 为划分区间的个数; $N$ 为样本数; $\Delta$ 为区域长度; $a$ 、 $b$ 分别为划分区间的上限和下限,区间长度划定后,把任一样本数据  $x_i$  落在区间  $(a_i, a_{i+1}]$  中的频数设为  $m_i$ ,频率  $f_i$  为

$$f_i = m_i / N \quad (3)$$

以分布区间  $(a_i, a_{i+1}]$  的组距为横坐标,以  $m_i$  和  $f_i$  作为变量评估软土物理力学参数的概率分布模型。“偏度、峰度检验法”是检验总体正态性的较为有效方法,若一组样本数据的偏斜度和峰值都接近于 0,则可以判定该组样本数据总体上满足正态分布;若峰值为正,则该组样本数据分布比正态分布形态更尖锐;若峰值为负,则该组样本数据分布比正态分布形态更平坦。

表 2 为太湖湖底软土物理力学参数概率分布统计表。以  $w$  为例,样本数  $N=9283$ 、 $a=86.4$ 、 $b=13.6$  代入式(1)和式(2)计算可得  $M=14.09$ 、 $\Delta=7.09$ ,将区间划分为 7 个,区间长度间隔为  $(a-b)/7=10.4$ ,由式(3)计算样本数据每个区间的频数和频率。进一步地,计算出偏斜度( $g_1$ )和峰值( $g_2$ )分别为 2.31 和



5.95, 拒绝正态分布假设检验, 不符合正态分布。同理, 太湖湖底  $S_r$ 、 $e$ 、 $I_p$ 、 $E_s$  拒绝正态假设检验, 不符合正态分布;  $W_p$  和  $W_L$  满足正态假设检验, 符合正态分布;  $\rho$  和  $\rho_d$  接近正态假设检验结果, 近似正态分布。

表2 太湖隧道湖底软土物理力学参数概率分布

Table 2 Probability distributions of physical and mechanical parameters of lakebed soft soils along the Taihu tunnel

参数	$g_1$	$g_2$	拒绝域 $ u_1 $	拒绝域 $ u_2 $	正态检验	检验结果
$w$	2.31	5.95	5.56	6.85	拒绝	非正态
$S_r$	2.37	8.82	5.95	10.15	拒绝	非正态
$e$	3.48	27.26	9.82	23.25	拒绝	非正态
$\rho$	1.77	1.31	1.79	2.14	拒绝	近似正态
$\rho_d$	1.79	1.29	1.76	1.41	拒绝	近似正态
$I_p$	3.93	24.70	11.09	21.06	拒绝	非正态
$W_p$	1.15	0.46	1.76	1.41	接受	正态分布
$W_L$	1.63	0.27	1.09	0.31	接受	正态分布
$E_s$	2.15	3.63	5.15	2.02	拒绝	非正态

### 2.3 软土物理力学参数空间分布规律

图2为太湖湖底软土物理力学参数空间分布, 以压缩系数和内摩擦角为例。由图2可知, 对比其他土类, 淤泥质土的压缩系数相对较高, 主要分布区间为  $0.1 \sim 2.3 \text{ MPa}^{-1}$ ; 粉土的内摩擦角相对较大, 而其他土类的内摩擦角主要分布在  $5 \sim 18^\circ$ 。总体来看, 压缩系数和内摩擦角在空间分布(深度和与湖中心距离)上无明显函数变化规律, 验证了软土变形参数和强度参数变异系数高的特征。

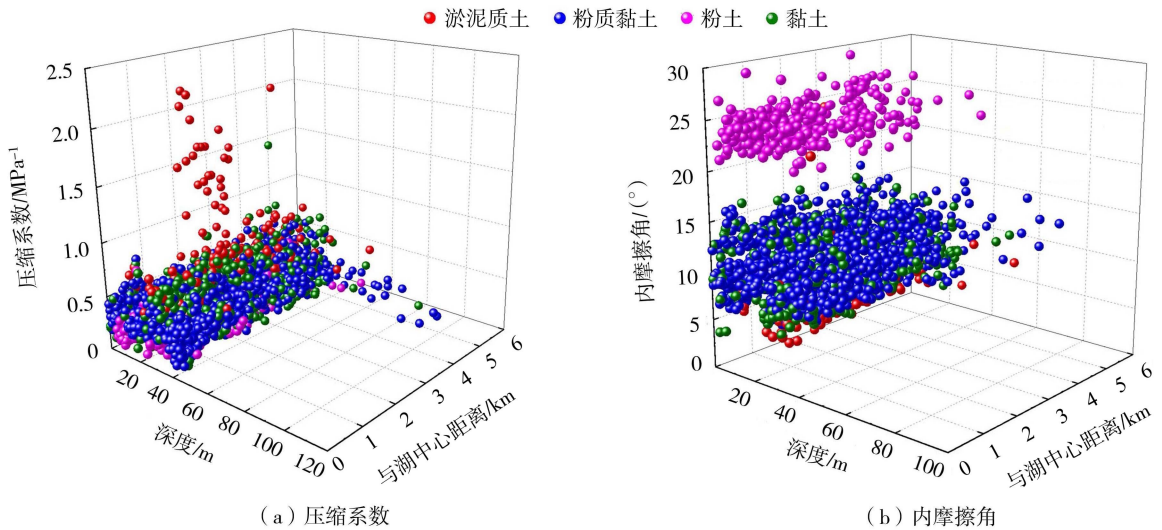


图2 太湖隧道湖底软土参数空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of lakebed soft soil parameters along the Taihu tunnel

## 3 物理力学参数相关性

对工程区软土的各项物理力学参数进行分析总结, 以期获得软土参数的变化规律与相关的回归方程, 为区域内隧道工程的建设提供参考依据。本文采用数理统计中的一元线性回归、多项式、对数非线性、幂函数、指数非线性等回归方法对各参数间的相关性进行研究。

### 3.1 物理力学参数间的相关性

基于前人的研究成果与大量的数理统计分析, 软土的各物理力学参数与  $w$ 、 $e$  之间存在一定的相关关系<sup>[13]</sup>。由表3可知,  $e$  与  $w$ 、 $\rho$  及  $\rho_d$  之间的相关性较好, 相关系数( $R$ )均大于0.95。其他物理力学参数与  $w$ 、 $e$  相关性一般, 说明了软土参数分布的不均匀, 需要更精细地划分研究。

根据 GB/T 50145—2007《土的工程分类标准》, 由图3可知, 太湖淤泥质土属于低液限土(CL), 黏土属于高液限黏质土(CH), 粉土属于低液限粉质土(ML), 粉质黏土包含4个亚层涵盖低液限黏质土(CL)、高液限黏质土(CH)、高液限粉质土(MH)多个区域。

表 3 物理力学参数间的相关性

Table 3 Correlation between physical and mechanical parameters

参数	回归方程	线型	$m_i$	$R$
$w-e$	$w = 35.008e + 0.711$	直线型	3 322	0.983
$\rho-e$	$\rho = -0.411ne + 1.842$	对数型	3 530	-0.969
$\rho_d-e$	$\rho_d = -0.6621ne + 1.362$	对数型	3 530	-0.998
$w_L-e$	$w_L = 1.613e^2 + 9.420e + 27.369$	多项式型	3 338	0.423
$w_p-e$	$w_p = -4.927e^2 + 15.515e + 12.559$	多项式型	3 338	0.434
$I_p-w$	$I_p = 0.0024w^2 + 0.0599w + 9.7841$	多项式型	3 083	0.364
$I_L-w$	$I_L = 1.3941nw - 4.099$	对数型	3 083	0.746

3.2 物理力学参数与变形参数间的相关性

3.2.1 与压缩系数的相关性

通过数理统计分析发现,与压缩系数相关程度最高的物理力学参数依次为天然孔隙比、干密度、天然含水率,其相关系数和回归方程见表 4。可以看出:各土层压缩系数与天然孔隙比及天然含水率之间呈线性正相关,与干密度之间具有对数函数关系,呈负相关关系,且相关性显著。对比其他土层,粉土的  $R$  处于 0.496~0.588 区间,明显偏小,这说明粉土的压缩系数分布相对不均匀,变化区间大。

表 4 物理力学参数与压缩系数的相关性

Table 4 Correlation between physical parameters and coefficient of compressibility

土层	参数	回归方程	线型	$m_i$	$R$
淤泥质土	$a_{1-2}-e$	$a_{1-2} = 1.486e - 1.035$	直线型	162	0.903
	$a_{1-2}-\rho_d$	$a_{1-2} = -3.6821n\rho_d + 1.546$	对数型	153	-0.890
	$a_{1-2}-w$	$a_{1-2} = 0.041w - 1.020$	直线型	164	0.882
粉质黏土	$a_{1-2}-e$	$a_{1-2} = 0.708e - 0.224$	直线型	1 788	0.760
	$a_{1-2}-\rho_d$	$a_{1-2} = -1.2771n\rho_d + 0.872$	对数型	1 788	-0.757
	$a_{1-2}-w$	$a_{1-2} = 0.018w - 0.173$	直线型	1 789	0.737
粉土	$a_{1-2}-e$	$a_{1-2} = 0.392e - 0.117$	直线型	622	0.588
	$a_{1-2}-\rho_d$	$a_{1-2} = -0.691n\rho_d + 0.477$	对数型	622	-0.575
	$a_{1-2}-w$	$a_{1-2} = 0.009w - 0.054$	直线型	623	0.496
黏土	$a_{1-2}-e$	$a_{1-2} = 0.878e - 0.417$	直线型	681	0.848
	$a_{1-2}-\rho_d$	$a_{1-2} = -1.6671n\rho_d + 0.991$	对数型	681	-0.844
	$a_{1-2}-w$	$a_{1-2} = 0.023w - 0.349$	直线型	682	0.819

3.2.2 与压缩模量的相关性

经数理统计分析,发现与压缩模量相关程度最高的物理力学参数依次为干密度、天然孔隙比、天然含水率,其相关系数和回归方程见表 5。可以看出:压缩模量与干密度、天然孔隙比及天然含水率之间均具有指数函数关系,其中与干密度呈正相关关系,与天然含水率及孔隙比呈负相关关系。对比压缩系数,压缩模量  $R$  的值相对较小,处于 0.389~0.748 之间。

3.3 物理力学参数与强度参数间的相关性

3.3.1 与黏聚力的相关性

黏聚力与内摩擦角是软土抗剪强度的主要参数,往往与土体内部的含水量和孔隙比息息相关。考虑到三轴试验的试样样本相对较少,本文只对直剪试验条件下的强度参数与物理力学参数间的相关性进行统计分析,将各土层孔隙比、含水率及干密度等物理力学参数与黏聚力的相关性分析结果汇总于表 6。可以看出:黏聚力与干密度、天然孔隙比及天然含水率之间具有指数或幂函数关系,其中与干密度之间呈正相关关系,而与天然含水率及孔隙比之间呈负相关关系。这是由于土体内部孔隙比与含水率的增加会造成含水量增加、薄膜水变厚、自由水流动加剧以及内摩擦角减少,从而使得黏聚力降低。粉土黏聚力的散点图呈云状分布,且  $R$  极小,这说明粉土黏聚力与自变量间不具有相关性,明显不同于其他土层的分布特性,呈现高度的不均匀性与复杂性。

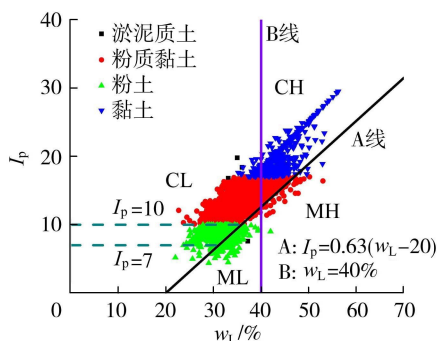


图 3 太湖隧道湖底软土各土类塑性图

Fig. 3 Plastic diagram of lakebed soft soils along the Taihu tunnel

表5 物理力学参数与压缩模量的相关性

Table 5 Correlation between physical parameters and compression moduli

土层	参数	回归方程	线型	$m_i$	$R$
淤泥质土	$E_s-\rho_d$	$E_s = 0.223e^{2.126\rho_d}$	指数型	162	0.748
	$E_s-e$	$E_s = 8.971e^{-0.871e}$	指数型	153	-0.689
	$E_s-w$	$E_s = 9.942e^{-0.027w}$	指数型	164	-0.741
粉质黏土	$E_s-\rho_d$	$E_s = 0.332e^{1.859\rho_d}$	指数型	1788	0.614
	$E_s-e$	$E_s = 19.125e^{-1.541e}$	指数型	1788	-0.611
	$E_s-w$	$E_s = 17.105e^{-0.040w}$	指数型	1789	-0.593
粉土	$E_s-\rho_d$	$E_s = 0.892e^{1.590\rho_d}$	指数型	622	0.455
	$E_s-e$	$E_s = 28.471e^{-1.344e}$	指数型	622	-0.460
	$E_s-w$	$E_s = 23.028e^{-0.031w}$	指数型	623	-0.389
黏土	$E_s-\rho_d$	$E_s = 0.145e^{2.543\rho_d}$	指数型	681	0.745
	$E_s-e$	$E_s = 32.835e^{-1.915e}$	指数型	681	-0.741
	$E_s-w$	$E_s = 28.618e^{-0.050w}$	指数型	682	-0.721

表6 物理力学参数与黏聚力间的相关性

Table 6 Correlation between physical parameters and cohesion

土层	参数	回归方程	线型	$m_i$	$R$
淤泥质土	$c-e$	$c = 16.013e^{-2.253}$	乘幂型	137	-0.762
	$c-\rho_d$	$c = 3.937\rho_d^{4.626}$	乘幂型	137	0.799
	$c-w$	$c = 98.537e^{-0.052w}$	指数型	137	-0.766
粉质黏土	$c-e$	$c = 20.617e^{-2.029}$	乘幂型	1561	-0.762
	$c-\rho_d$	$c = 0.330e^{3.038\rho_d}$	指数型	1561	0.761
	$c-w$	$c = 1.837w^{-1.9}$	乘幂型	1566	-0.763
粉土	$c-e$	$c = 13.066e^{0.035e}$	指数型	391	0.033
	$c-\rho_d$	$c = 13.97e^{-0.026\rho_d}$	指数型	391	0.020
	$c-w$	$c = 13.198e^{0.0006w}$	指数型	392	0.022
黏土	$c-e$	$c = 339.53e^{-2.474e}$	指数型	605	-0.866
	$c-\rho_d$	$c = 6.348\rho_d^{4.729}$	乘幂型	605	0.864
	$c-w$	$c = 295.19e^{-0.066w}$	指数型	606	-0.856

### 3.3.2 与内摩擦角的相关性

同理,各土层孔隙比、含水率及干密度等物理力学参数与内摩擦角间的相关性分析结果汇总于表7。可以看出:内摩擦角与天然含水率、天然孔隙比及干密度之间具有指数或幂函数关系,且与干密度之间呈正相关关系,与天然含水率及孔隙比之间呈负相关关系。与黏聚力的分布特征类似,黏土内摩擦角和自变量间的相关性较好,淤泥质土与粉质黏土次之,粉土最差。

表7 物理力学参数与内摩擦角间的相关性

Table 7 Correlation between physical parameters and internal friction angle

土层	参数	回归方程	线型	$m_i$	$R$
淤泥质土	$\varphi-w$	$\varphi = 37.745e^{-0.046w}$	指数型	137	-0.702
	$\varphi-e$	$\varphi = 7.535e^{-2.032}$	乘幂型	137	-0.715
	$\varphi-\rho_d$	$\varphi = 2.130\rho_d^{4.159}$	乘幂型	137	0.741
粉质黏土	$\varphi-w$	$\varphi = 540.31w^{-1.19}$	乘幂型	1561	-0.708
	$\varphi-e$	$\varphi = 7.719e^{-1.251}$	乘幂型	1561	-0.696
	$\varphi-\rho_d$	$\varphi = 0.604e^{1.873\rho_d}$	指数型	1566	0.695
粉土	$\varphi-w$	$\varphi = 28.549w^{-0.054}$	乘幂型	391	-0.135
	$\varphi-e$	$\varphi = 25.581e^{-0.085e}$	指数型	391	-0.155
	$\varphi-\rho_d$	$\varphi = 20.752e^{0.094\rho_d}$	指数型	392	0.145
黏土	$\varphi-w$	$\varphi = 42.652e^{-0.044w}$	指数型	605	-0.844
	$\varphi-e$	$\varphi = 46.684e^{-1.639e}$	指数型	605	-0.852
	$\varphi-\rho_d$	$\varphi = 3.338\rho_d^{3.137}$	乘幂型	606	0.851

### 3.4 变形参数与强度参数间的相关性

将压缩系数与压缩模量作为自变量,分析各土层变形参数与强度参数间的相关关系,相关性分析结果见表 8 和表 9。可以看出:压缩系数与强度参数间呈负相关关系,具有指数或幂函数关系,而压缩模量与之相反。对比压缩模量,压缩系数与强度参数之间具有更好的相关关系。此外,各土层中黏土的相关系数最大,而粉土最小。

表 8 压缩系数与强度参数间的相关性

Table 8 Correlation between coefficient of compressibility and shear strength parameters

土层	参数	回归方程	线型	$m_i$	$R$
淤泥质土	$c-a_{1-2}$	$c = 22.854e^{-1.047a_{1-2}}$	指数型	97	-0.849
	$\varphi-a_{1-2}$	$\varphi = 10.347e^{-0.893a_{1-2}}$	指数型	97	-0.728
粉质黏土	$c-a_{1-2}$	$c = 13.776a_{1-2}^{-0.792}$	乘幂型	1525	-0.687
	$\varphi-a_{1-2}$	$\varphi = 5.851a_{1-2}^{-0.512}$	乘幂型	1525	-0.656
粉土	$c-a_{1-2}$	$c = 13.136a_{1-2}^{-0.012}$	乘幂型	380	-0.037
	$\varphi-a_{1-2}$	$\varphi = 24.288e^{-0.081a_{1-2}}$	指数型	380	-0.094
黏土	$c-a_{1-2}$	$c = 88.602e^{-2.36a_{1-2}}$	指数型	594	-0.852
	$\varphi-a_{1-2}$	$\varphi = 19.32e^{-1.583a_{1-2}}$	指数型	594	-0.849

表 9 压缩模量与强度参数间的相关性

Table 9 Correlation between compression moduli and shear strength parameters

土层	参数	回归方程	线型	$m_i$	$R$
淤泥质土	$c-E_s$	$c = 3.648E_s^{0.936}$	乘幂型	136	0.669
	$\varphi-E_s$	$\varphi = 1.921E_s^{0.882}$	乘幂型	136	0.611
粉质黏土	$c-E_s$	$c = 8.251E_s^{0.826}$	乘幂型	1525	0.623
	$\varphi-E_s$	$\varphi = 4.160E_s^{0.539}$	乘幂型	1525	0.601
粉土	$c-E_s$	$c = 12.883E_s^{0.018}$	乘幂型	380	0.049
	$\varphi-E_s$	$\varphi = 23.384E_s^{0.010}$	乘幂型	380	0.052
黏土	$c-E_s$	$c = 7.996E_s^{0.868}$	乘幂型	594	0.777
	$\varphi-E_s$	$\varphi = 3.809E_s^{0.588}$	乘幂型	594	0.782

## 4 结 论

a. 太湖湖底沉积软土物理力学参数中密度、干密度、饱和度变异系数小于 0.1,而天然含水率、天然孔隙比、液限、塑限、塑性指数、液性指数变异系数均大于 0.1。对比其他湖相软土,变形参数和强度参数变异系数较高,均大于 0.4,在空间分布(深度和距湖中心距离)上无明显的函数变化规律,亟需做好前期野外勘察和土工试验工作。

b. 塑限和液限满足正态假设检验,符合正态分布;密度和干密度接近正态假设检验,近似正态分布;而天然含水率、饱和度、天然孔隙比、塑性指数、压缩模量拒绝正态假设检验,不符合正态分布,这与太湖地区软土的沉积环境多变、地质成因多元、地层分布不均的实际情况相符。

c. 物理力学参数中天然含水率、天然孔隙比及干密度与强度参数、变形参数之间呈显著的相关性,具有指数或幂函数关系。对比压缩模量,压缩系数和强度参数具有更好的相关性,因此,建议优先选取压缩系数通过回归方程来推算强度参数,同时加强不同排水条件下各类软土抗剪强度的研究。

d. 湖底软土地层中黏土变形参数与强度参数间的相关程度最高,淤泥质土与粉质黏土次之,粉土最低,且粉土是工程区主要的微承压含水层,联通地表湖水。

### 参考文献:

- [1] 尹利华,王晓谋,张留俊. 天津软土土性指标概率分布统计分析[J]. 岩土力学,2010,31(增刊2):462-469. (YIN Lihua, WANG Xiaomou, ZHANG Liujun. Probabilistical distribution statistical analysis of Tianjin soft soil indices[J]. Rock and Soil Mechanics,2010,31(Sup2):462-469. (in Chinese))
- [2] 申政,闵凡路,柏煜新,等. 砂土地层水下盾构隧道开挖面被动破坏数值模拟[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(1):158-166. (SHEN Zheng, MIN Fanlu, BAI Yuxin, et al. Numerical simulation of passive failure of underwater shield tunnel



- excavation face in sandy soil layer[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51(1): 158-166. (in Chinese))
- [ 3 ] 卢毅,宋泽卓,刘瑾,等. 基于 DFOS 的通州湾地区地面沉降监测与变形分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(2): 81-88. (LU Yi, SONG Zezhuo, LIU Jin, et al. Land subsidence monitoring and deformation analysis of Tongzhou Bay area based on DFOS[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51(2): 81-88. (in Chinese))
- [ 4 ] 鲍金虎,苏静波,吴锋,等. 深厚软黏土地基中大直径单桩基础现场水平受荷试验及  $p$ - $y$  曲线适用性研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(3): 127-134. (BAO Jinhui, SU Jingbo, WU Feng, et al. Field horizontal loading test and  $p$ - $y$  curve applicability of large-diameter single pile foundation in deep soft clay ground sill[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51(3): 127-134. (in Chinese))
- [ 5 ] 刘嘉正. 里下河潟湖相软土土性参数变异性统计分析[J]. 土工基础, 2023, 37(6): 979-981. (LIU Jiazheng. Statistical analysis of the variability of engineering characteristics of soft soil in the Lixiahe area[J]. Soil Engineering and Foundation, 2023, 37(6): 979-981. (in Chinese))
- [ 6 ] 甘建军,李荐华,唐春,等. 鄱阳湖区深厚湖相沉积软土工程特性研究[J]. 南昌工程学院学报, 2019, 38(6): 1-12. (GAN Jianjun, LI Jianhua, TANG Chun, et al. Study on engineering characteristic of deep lacustrine soft soil in Poyang Lake district [J]. Journal of Nanchang Institute of Technology, 2019, 38(6): 1-12. (in Chinese))
- [ 7 ] 刘海军,韩亮,仇文岗,等. 滇池湖相粉土的工程性质[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(34): 14700-14712. (LIU Haijun, HAN Liang, ZHANG Wengang, et al. Engineering properties of lacustrine silty soil in Dianchi Lake [J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(34): 14700-14712. (in Chinese))
- [ 8 ] 裘友强,张留俊,富志鹏,等. 内陆河湖相软土土性指标统计特征与竖向变化规律研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2023, 54(12): 23-34. (QIU Youqiang, ZHANG Liujun, FU Zhipeng, et al. Study on statistical characteristics and vertical change law of soil index for soft soil in the inland fluvial-lacustrine sediments[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2023, 54(12): 23-34. (in Chinese))
- [ 9 ] 张继周,缪林昌,陈俊波. 苏中腹地湖相软土土性参数变异性统计描述[J]. 岩土力学, 2010, 31(2): 471-477. (ZHANG Jizhou, MIAO Linchang, CHEN Junbo. Statistical characterization of variability of lacustrine soft soil in central region of Jiangsu Province[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(2): 471-477. (in Chinese))
- [ 10 ] 李旭昶,孙德安,徐永福. 扬州土物理与力学性质指标的相关性分析[J]. 工程地质学报, 2019, 27(2): 333-340. (LI Xuchang, SUN Dean, XU Yongfu. Study on correlations of physical and mechanical property indexes of Yangzhou clays[J]. Journal of Engineering Geology, 2019, 27(2): 333-340. (in Chinese))
- [ 11 ] 欧阳恒,邱宗新,王启云,等. 福州典型软土物理力学性质指标相关性研究[J]. 中国科技论文, 2019, 14(12): 1341-1347. (OUYANG Heng, QIU Zongxin, WANG Qiyun, et al. Correlation of physico-mechanical property indexes of typical soft soils in Fuzhou[J]. China Sciencepaper, 2019, 14(12): 1341-1347. (in Chinese))
- [ 12 ] 屈若枫,徐光黎,王金峰,等. 武汉地区典型软土物理力学指标间的相关性研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(增刊2): 113-119. (QU Ruofeng, XU Guangli, WANG Jinfeng, et al. Correlations of physical and mechanical properties of typical soft soils in Wuhan[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(Sup2): 113-119. (in Chinese))
- [ 13 ] 郭林坪,穆坤,杨爱武,等. 天津滨海新区黏性土物理力学性质指标相关性[J]. 地下空间与工程学报, 2019, 15(2): 452-457. (GUO Linping, MU Kun, YANG Aiwu, et al. Correlation analysis on physico-mechanical properties of clayey soil in Binhai new area in Tianjin[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2019, 15(2): 452-457. (in Chinese))
- [ 14 ] 孙毅力,于洪民. 北京区域土的压缩性与物理指标相关性分析[J]. 地震工程学报, 2015, 37(增刊1): 26-29. (SUN Yili, YU Hongmin. Correlation analysis of the compressibility and physical indices of soils in Beijing [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2015, 37(Sup1): 26-29. (in Chinese))
- [ 15 ] 王立军,王泽新,刘吉永. 水利工程中土体抗剪强度指标的选用[J]. 人民黄河, 2021, 43(增刊1): 142-143. (WANG Lijun, WANG Zexin, LIU Jiyong. Selection of shear strength indexes of soils in hydraulic engineering projects[J]. Yellow River, 2021, 43(Sup1): 142-143. (in Chinese))

(收稿日期: 2024-05-15 编辑: 刘晓艳)