



典型流域河流相粉质黏土层物理力学指标相关性分析

史敬涛¹, 颜翔锦², 田野¹, 王末¹, 王江玉龙¹, 姜禹戈¹, 孙欢¹

1. 中国地质调查局廊坊自然资源综合调查中心, 河北廊坊 065000;

2. 中国地质调查局牡丹江自然资源综合调查中心, 黑龙江牡丹江 157021

摘要: 基于辽宁省辽阳市平原区不同地点、不同深度粉质黏土的土工试验结果, 采用一元线性回归分析, 对粉质黏土 16 种物理力学指标的变异性及相互间关系进行数理统计。研究结果表明: 1) 不同深度、不同地点的土质类型主要是粉质黏土, 其含水率较高, 且多呈湿、可塑状态; 2) 粉质黏土湿密度、天然重度、土粒比重、饱和度、孔隙率、液限、塑限 7 种物理指标的变异系数均较小, 压缩系数、压缩模量、黏聚力、内摩擦角 4 种力学指标的变异系数较大; 3) 粉质黏土湿密度与天然重度、液限与塑性指数具有良好的线性关系。

关键词: 平原区; 粉质黏土; 土工试验; 物理力学指标; 回归分析; 辽宁省

CORRELATION ANALYSIS OF PHYSICAL AND MECHANICAL INDEXES OF FLUVIAL SILTY CLAY LAYER IN TYPICAL RIVER BASINS

SHI Jing-tao¹, YAN Xiang-jin², TIAN Ye¹, WANG Mo¹, WANG Jiang-yu-long¹, JIANG Yu-ge¹, SUN Huan¹

1. Langfang Natural Resources Survey Center, CGS, Langfang 065000, Hebei Province, China;

2. Mudanjiang Natural Resources Survey Center, CGS, Mudanjiang 157021, Heilongjiang Province, China

Abstract: Based on the soil test results of silty clay at different sites and depths in the plain area of Liaoyang City, Liaoning Province, the variability and correlation of 16 physical and mechanical indexes of silty clay are analyzed by unitary linear regression analysis. The results show that the soil types at different depths and locations are dominated by silty clay, with high water content, mostly in wet and plastic state. The variation coefficients of 7 physical indexes of silty clay including wet density, natural gravity, specific gravity of soil particles, saturation, porosity, liquid limit and plastic limit are small, while the variation coefficients of 4 mechanical indexes such as compression coefficient, compression modulus, cohesion and internal friction angle are large. There is a good linear relation between wet density and natural weight-specific density, and between liquid limit and plastic index of silty clay.

Key words: plain area; silty clay; soil test; physical and mechanical index; regression analysis; Liaoning Province

0 引言

土遍布地表, 是自然界的产物, 不同地方、不同深度、不同季节的土千变万化, 各有特性^[1]。土的物理力

学指标可有效区分土的类型, 精准计算出土的承载力, 这不仅适应种植业需求, 还对工程选址具有重要意义。如何准确选择符合工程建筑要求参数的土, 对其上的

收稿日期: 2023-04-11; 修回日期: 2023-06-21。编辑: 张哲。

基金项目: 中国地质调查局项目“辽阳市多要素城市地质调查”(DD20191025); “滦河流域中上游生态修复支撑调查”(ZD20220204)。

作者简介: 史敬涛(1995—), 男, 主要从事工程地质、地球化学工作, 通信地址 河北省廊坊市广阳区广阳道 93 号, E-mail//1083231319@qq.com

通信作者: 田野(1988—), 男, 工程师, 主要从事城市地质、矿产勘查工作, 通信地址 河北省廊坊市广阳区广阳道 93 号, E-mail//tianye@mail.cgs.gov.cn

建筑有至关重要的影响^[2-4].

本文基于辽宁省辽阳市多要素城市地质调查项目研究成果,将辽阳市平原区作为研究区.通过对照收集的前人调查资料,研究区内缺乏工程地质特性研究分析.因此,本研究采用实地调查与土工试验分析相结合的方式,对粉质黏土的物理力学性质进行深入研究,并对各自变异性及相互间相关性进行着重分析,建立相关性较强的两种指标拟合曲线和回归方程,为工程设计方面提供基本数据支撑^[5-16].

1 研究区概况

研究区位于冲洪积平原-丘陵过渡区(图 1),西部平原区以河流相为主,由山前向西第四系厚度逐渐加大,第四系在东部低山丘陵区不发育,主要在河谷区

呈条带状分布,厚度一般数米至十多米^[17-18].地层上部主要为粉质黏土层,埋藏较浅,位于人工土层之下砂土层之上.其中全新统冲积成因粉质黏土分布于西马峰镇南部太子河扇地附近,冲洪积成因粉质黏土分布于白塔区冲洪积阶地一带,更新统冲洪积成因粉质黏土分布于张台子镇-灯塔市近山一带,坡洪积成因粉质黏土分布于沙浒镇坡洪积扇裙一带,为工程建设浅地基理想的持力层.

2 样品采集与试验分析

通过钻探选取 534 个不同地点、不同深度的粉质黏土样品进行试验分析.试验所用土样均按规范要求采取原状样,且试验时保持恒定的温度和湿度,避免温度和湿度对土样产生任何影响,保证准确度^[19].

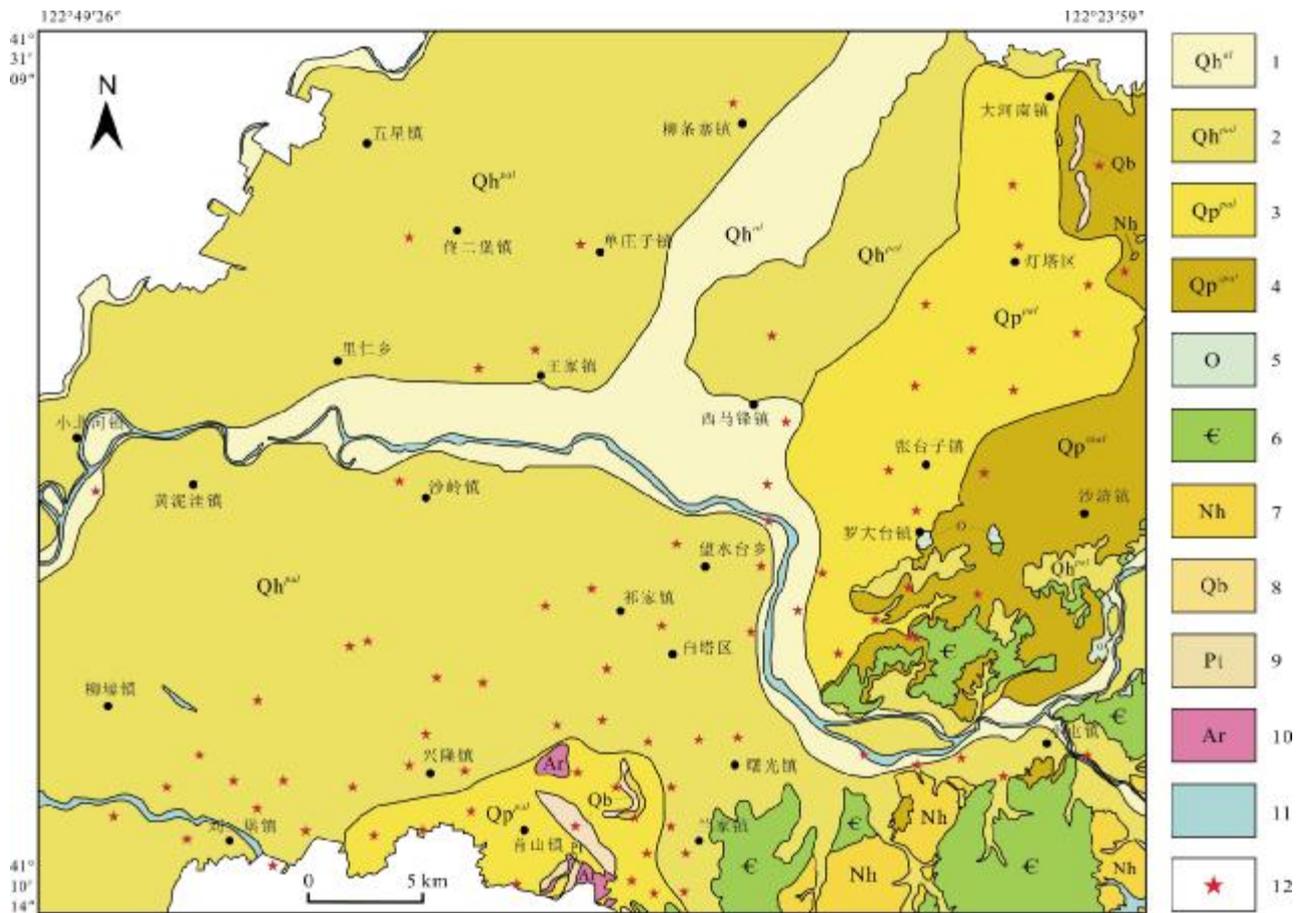


图 1 辽阳市平原区第四系分布图

Fig. 1 Distribution map of Quaternary in the plain area of Liaoyang City

1—全新统冲积物(Holocene alluvium); 2—全新统冲洪积物(Holocene alluvium-diluvium); 3—更新统冲洪积物(Pleistocene alluvium-diluvium); 4—更新统坡洪积物(Pleistocene slope diluvium); 5—奥陶系(Ordovician); 6—寒武系(Cambrian); 7—南华系(Nanhua System); 8—青白口系(Qingbaikou System); 9—古元古代(Paleoproterozoic); 10—新太古代(Neoarchean); 11—水系(water system); 12—钻孔(borehole)

3 粉质黏土物理力学特征

为了解研究区粉质黏土物理力学性质,评价粉质黏土特性,通过数理统计着重分析了研究区内粉质黏土物理力学指标的指标值(最大值、最小值、平均值)、标准差以及变异系数,统计结果如表 1 所示.由于沉积环境的变化,辽阳地区粉质黏土在不同成因下的指标具有差异性,因此通过绘制箱式图,判断指标的离散分布情况,结果如图 2 所示.

研究区内粉质黏土的含水率(ω)通常介于 9.00%~44.10%,平均值为 25.85%,变异系数为 0.14,含水率较高,多呈湿状态.液限(ω_L)通常介于 25.80%~39.40%,平均值为 33.33%,变异系数为 0.08.液性指数(I_L)通常介于-0.73~+1.38,平均值为 0.47,变异系数为 0.52,变异系数较高.其中全新统冲积成因下粉质黏土 ω 和 ω_L 的均值最低,分别为 24.74%、32.41%;而 I_L 却相对较高,为 1.25,远高于其他成因下粉质黏土 I_L 值.由箱式图(图 2)可知,各成因下,粉质黏土的 ω 、 ω_L 指

标箱体和端线均较短,因此数据相对集中,而全新统粉质黏土相对于更新统数据更分散,具有较高的最大值和最小值.由此可知研究区内不同成因、不同地点、不同深度的粉质黏土天然状态有很大差别,大多为可塑状态,小部分为坚硬、硬塑、软塑和流塑状态.

研究区内粉质黏土湿密度(ρ)通常介于 1.71~2.13 g/cm³,平均值为 1.93 g/cm³,变异系数为 0.03.天然重度(γ)通常介于 16.77~20.89 kN/m³,平均值为 18.90 kN/m³,变异系数为 0.03.土粒比重(G_s)通常介于 2.77~2.78 g/cm³,平均值为 2.72,变异系数为 0.00.三者变异系数较小,不同成因下其均值相差不大,且由箱式图(图 2)可看出,三者箱体端线均较短,可知研究区内不同成因、不同地点、不同深度的粉质黏土物质组成和结构特性基本相同.

研究区内粉质黏土压缩系数(a_{1-2})通常介于 0.09~1.47 MPa⁻¹,平均值为 0.37 MPa⁻¹,变异系数为 0.41.压缩模量(E_{s1-2})通常介于 1.56~19.40 MPa,平均值为

表 1 辽阳市平原区粉质黏土物理力学指标统计表

Table 1 Statistics of physical and mechanical indexes of silty clay in the plain area of Liaoyang City

指标名称	代号/单位	总体指标值					不同成因指标均值			
		最小值	最大值	平均值	标准差	变异系数	Qh ^{al}	Qh ^{pal}	Qp ^{pal}	Qp ^{spal}
含水率	$\omega/\%$	9.00	44.10	25.85	3.63	0.14	24.74	26.22	25.08	25.87
湿密度	$\rho/(\text{g}/\text{cm}^3)$	1.71	2.13	1.93	0.07	0.03	1.94	1.93	1.91	1.93
天然重度	$\gamma/(\text{kN}/\text{m}^3)$	16.77	20.89	18.90	0.64	0.03	19.09	18.97	18.75	18.94
土粒比重	$G_s/(\text{g}/\text{cm}^3)$	2.66	2.78	2.72	0.01	0.00	2.72	2.72	2.72	2.73
饱和度	$S_r/\%$	44.70	99.90	90.29	6.42	0.07	90.24	91.44	87.23	90.56
孔隙率	$n/\%$	0.81	53.80	43.67	3.58	0.08	42.55	43.71	43.83	43.71
孔隙比	e_o	0.49	1.29	0.78	0.10	0.13	0.75	0.78	0.78	0.78
固结荷重	e_i	0.42	1.04	0.71	0.08	0.11	0.67	0.70	0.71	0.71
液限	$\omega_L/\%$	25.80	39.40	33.33	2.58	0.08	32.41	33.12	33.08	34.37
塑限	$\omega_p/\%$	15.40	27.10	19.44	1.21	0.06	19.12	19.46	19.20	19.76
塑性指数	I_p	9.80	17.30	13.88	1.74	0.13	12.47	13.66	13.88	14.61
液性指数	I_L	-0.73	1.38	0.47	0.24	0.52	1.25	0.51	0.42	0.43
压缩系数	a_{1-2}/MPa^{-1}	0.09	1.47	0.37	0.15	0.41	0.35	0.36	0.39	0.33
压缩模量	E_{s1-2}/MPa	1.56	19.40	5.61	2.30	0.41	5.61	5.42	5.13	6.28
黏聚力	c/kPa	10.00	85.50	30.08	8.48	0.28	29.88	28.65	30.99	33.37
内摩擦角	$\varphi/(\text{°})$	3.40	24.60	15.16	2.94	0.19	16.34	15.85	16.45	15.43

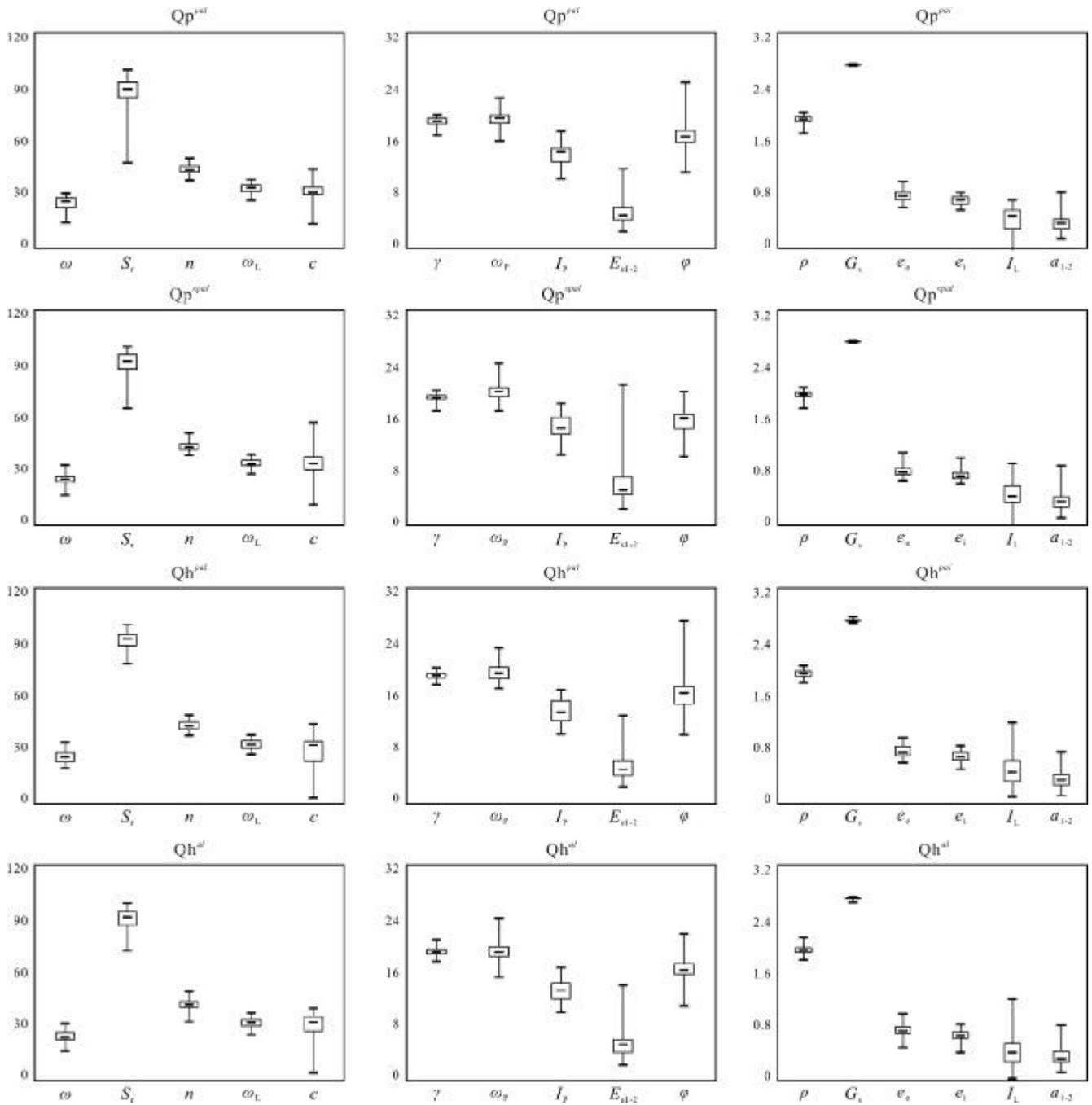


图 2 不同成因环境下粉质黏土箱式图

Fig. 2 Box diagrams of silty clay under different genetic environments

Qh^h—全新统冲积物(Holocene alluvium); Qh^d—全新统冲洪积物(Holocene alluvium-diluvium); Qp^{hol}—更新统冲洪积物(Pleistocene alluvium-diluvium); Qp^{plu}—更新统坡洪积物(Pleistocene slope diluvium)

5.61 MPa, 变异系数为 0.41. 其中更新统坡洪积成因的粉质黏土 a_{1-2} 均值最小, 为 0.33 MPa⁻¹; E_{s1-2} 均值最大, 为 6.28 MPa. 由箱式图(图 2)可知, 4 种成因下, 粉质黏土 a_{1-2} 具有相似的离散性, E_{s1-2} 具有相似的箱体, 但更新统坡洪积成因下, 粉质黏土具有较大的 E_{s1-2} . 根据

规程规范中“压缩系数(a_{1-2})介于 0.1 MPa⁻¹ 至 0.5 MPa⁻¹ 之间的为中压缩性土”, 可知研究区内多为中压缩性土, 且更新统坡洪积成因下, 粉质黏土具有较小的压缩性, 其他成因的粉质黏土具有相似压缩性.

研究区内粉质黏土黏聚力 (c) 通常介于 10.00~

85.50 kPa,平均值为 30.08 kPa,变异系数为 0.28. 内摩擦角(φ)通常介于 3.40~24.60°,平均值为 15.16°,变异系数为 0.19. 更新统坡洪积成因下粉质黏土具有较高的 c 值,表明土质稳定性相对其他成因较好. 二者变异系数相对较大,由箱式图(图 2)可知, c 和 φ 的箱体和端线均较长,可判断研究区内粉质黏土黏聚力和内摩擦角的离散特性较大,土质结构的稳定性差异较大.

通过对研究区内粉质黏土 16 种物理力学指标的变异系数进行计算分析,可知研究区内湿密度、天然重度、土粒比重、饱和度(S_r)、孔隙率(n)、液限、塑限(ω_p) 7 种物理指标的变异系数均较小,值小于 0.1,在查明利用数据时,可作为常量处理. 含水率、孔隙比(e)、固结荷重(e_i)、塑性指数(I_p) 4 种物理指标的变异系数相对较小,值小于 0.15,在勘察设计时,可根据实际工作情况进行取舍. 压缩系数、压缩模量、黏聚力、内摩擦角 4 种力学指标变异系数均大于 0.15,值多大于 0.25,

实际工作中,需作为变量处理. 对液性指数要格外关注,其变异系数已达到 0.52,可判断研究区内粉质黏土液性指数的离散性较强.

4 粉质黏土物理力学指标相关性分析

利用 SPSS 对研究区内粉质黏土的含水率、湿密度、天然重度、土粒比重、饱和度、孔隙率、孔隙比、固结荷重、液限、塑限、塑性指数、液性指数、压缩系数、压缩模量、黏聚力、内摩擦角 16 种物理力学性质指标进行了相关性分析,如表 2 所示. 相互间相关性分析结果表明: 1)物理指标方面,天然重度与湿密度有较高的相关性,固结荷重与湿密度、天然重度、孔隙率、孔隙比有较高的相关性,塑限与液限有较高的相关性; 2)力学指标方面,塑性指数与液限有较高的相关性,液性指数与含水率、孔隙比有较高的相关性,压缩系数与含水率、湿密度、天然重度、孔隙率、孔隙比、液性指数有较

表 2 辽阳市平原区粉质黏土物理力学指标相关性统计表

Table 2 Statistics of physical and mechanical index correlation of silty clay in the plain area of Liaoyang City

指标	ω	ρ	γ	G_s	S_r	n	e_0	e_i	ω_L	ω_p	I_p	I_L	a_{1-2}	E_{s1-2}	c	φ
ω	1															
ρ	-0.539	1														
γ	-0.494	0.948	1													
G_s	0.193	-0.018	-0.015	1												
S_r	0.383	0.517	0.517	0.095	1											
n	0.716	-0.709	-0.745	0.121	0.045	1										
e_0	0.835	-0.893	-0.833	0.187	-0.132	0.791	1									
e_i	0.642	-0.749	-0.785	0.168	-0.173	0.715	0.803	1								
ω_L	0.377	-0.164	-0.154	0.506	0.185	0.315	0.325	0.426	1							
ω_p	0.418	-0.264	-0.270	0.260	0.130	0.368	0.392	0.484	0.812	1						
I_p	0.267	-0.059	-0.040	0.568	0.183	0.210	0.208	0.293	0.914	0.506	1					
I_L	0.869	-0.469	-0.426	-0.029	0.345	0.609	0.707	0.455	-0.090	-0.011	-0.125	1				
a_{1-2}	0.685	-0.689	-0.642	0.031	-0.062	0.636	0.786	0.484	0.089	0.095	0.066	0.668	1			
E_{s1-2}	-0.489	0.508	0.489	0.084	0.035	-0.502	-0.550	-0.354	0.037	0.007	0.050	-0.531	-0.794	1		
c	-0.541	0.423	0.427	0.268	-0.151	-0.577	-0.512	-0.274	0.233	0.060	0.302	-0.689	-0.575	0.484	1	
φ	-0.369	0.258	0.301	0.222	-0.139	-0.332	-0.346	-0.297	-0.173	-0.238	-0.091	-0.294	-0.345	0.265	0.538	1

高的相关性,黏聚力与液性指数有较高的相关性.在研究区内粉质黏土的 16 种物理力学性质指标的相关性分析结果基础上,对具有较高相关性的两种指标分别进行了回归分析.本次回归分析主要采用了一元线性回归模型,建立了回归方程,并对两种指标数据进行拟合,形成拟合曲线(图 3、4).

4.1 物理指标相关性分析

建立土的物理力学指标相互间关系,在工程上具有重要的现实意义.由图 3 可知,孔隙率与固结荷重呈正相关关系,与湿密度、天然重度呈负相关关系;孔隙比与固结荷重、液性指数呈正相关关系,与湿密度、天然重度呈负相关关系;湿密度与天然重度呈正相关关系,与固结荷重呈负相关关系;天然重度与固结荷重呈负相关关系;液限与塑限、塑性指数呈正相关关系;

塑性指数与液性指数基本不相关.

4.2 物理指标与力学指标相关性分析

研究物理力学指标间的相关性,对深入分析土质、土性至关重要,并且对工程建设工作的经济性、安全性也都具有重要意义^[20-21].由图 4 可知,压缩系数与含水率、孔隙率、孔隙比、液性指数呈正相关关系,与湿密度、天然重度呈负相关关系,反映了该区粉质黏土的天然状态与其力学性质关系较大;压缩模量与湿密度呈正相关关系,与孔隙率、孔隙比呈负相关关系;黏聚力与内摩擦角呈正相关关系,与含水率、孔隙率、孔隙比、液性指数、压缩系数呈负相关关系.

5 结论

1)研究区内不同深度、不同地点的土质类型主要

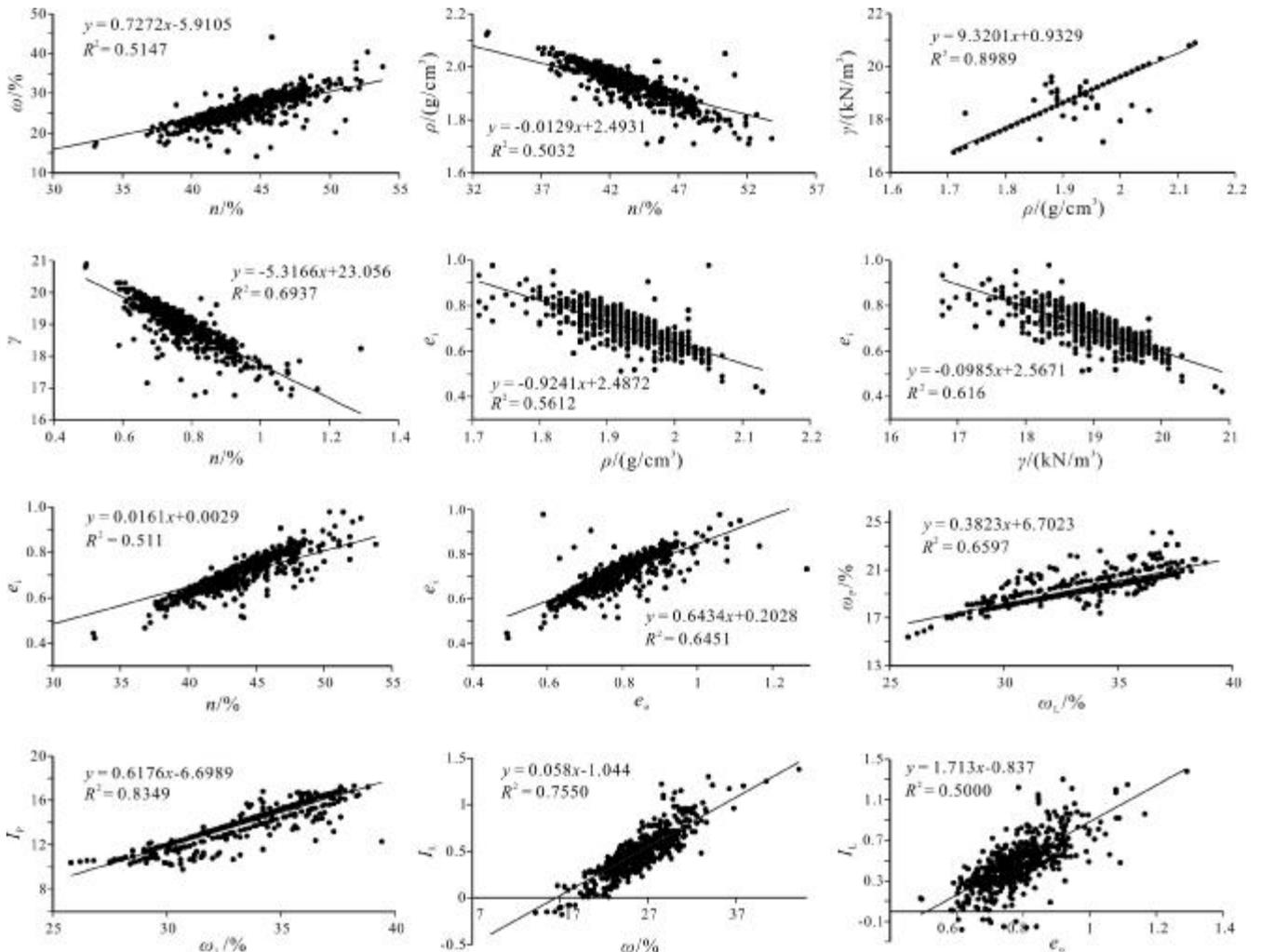


图 3 辽阳市平原区粉质黏土物理指标拟合关系曲线

Fig. 3 Fitting curves of physical indexes of silty clay in the plain area of Liaoyang City

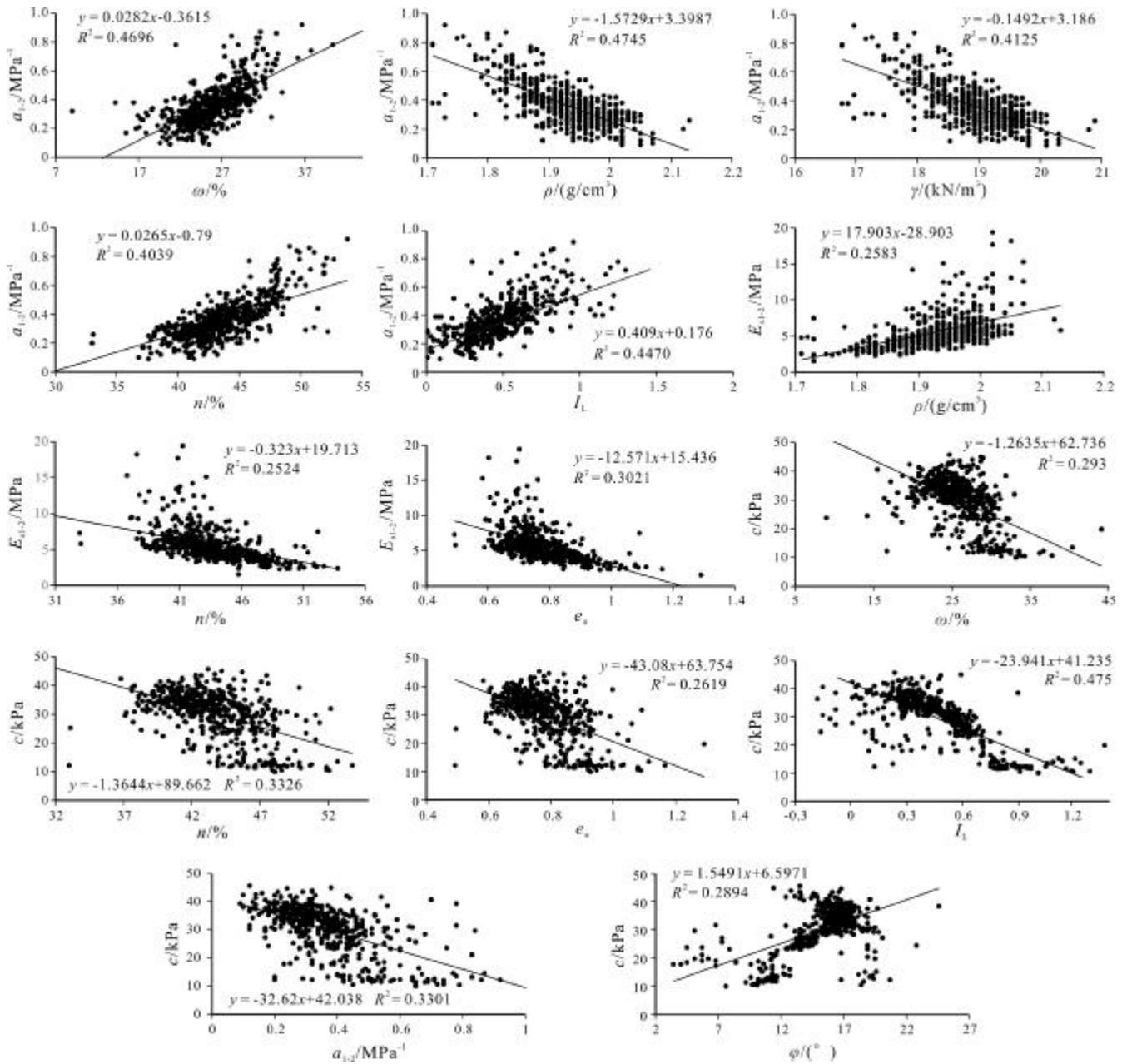


图4 辽阳市平原区粉质黏土物理力学指标拟合关系曲线

Fig. 4 Fitting curves of physical and mechanical indexes of silty clay in the plain area of Liaoyang City

是粉质黏土,其含水率较高,且多呈湿、可塑状态. 由箱式图得出, 4种成因下,含水率、湿密度、天然重度、土粒比重和液限数据相对集中, 其余指标数据相对分散. 其中全新统粉质黏土的天然状态较更新统更分散,更新统坡洪积成因下,粉质黏土具有较小的压缩性和较高的黏聚力,其土质相对较稳定.

2)研究区内粉质黏土湿密度、天然重度、土粒比

重、饱和度、孔隙率、液限、塑限7种物理指标的变异系数均较小,表明指标较稳定,可靠性较好. 压缩系数、压缩模量、黏聚力、内摩擦角4种力学指标的变异系数较大,表明指标离散性较大,可靠性较差.

3)研究区内粉质黏土湿密度与天然重度,液限与塑性指数相关系数均大于0.8,具有良好的线性关系; 塑性指数与液性指数基本不相关.

参考文献(References):

- [1] 史健, 马剑秋, 崔恩革. 盘锦地区粘土物理力学指标的相关性分析[J]. 山西建筑, 2007, 33(20): 83-84.
Shi J, Ma J Q, Cui E G. Interrelation of physical and mechanical indexes on clay of Panjin[J]. Shanxi Architecture, 2007, 33(20): 83-84.
- [2] 佟智强, 杨洪祥, 宋立东, 等. 黑龙江省牡丹江市自然资源禀赋特征及开发潜力分析[J]. 地质与资源, 2023, 32(5): 599-607.
Tong Z Q, Yang H X, Song L D, et al. Characteristics of natural resources endowment and development potential in Mudanjiang City, Heilongjiang Province. Geology and Resources, 2023, 32(5): 599-607.
- [3] 赵怀东. 辽阳市某化工公司工程地质勘察与基础设计探讨[J]. 吉林地质, 2009, 28(1): 80-83, 88.
Zhao H D. Engineering geological investigation and foundation design of a chemical factory in Liaoyang City[J]. Jilin Geology, 2009, 28(1): 80-83, 88.
- [4] 石旭飞, 代雅建, 崔健, 等. 沈阳市城市地质环境问题研究[J]. 地质与资源, 2017, 26(4): 390-396.
Shi X F, Dai Y J, Cui J, et al. Study on the geological environment of Shenyang City[J]. Geology and Resources, 2017, 26(4): 390-396.
- [5] 薛振声, 成益洋, 崔康伟, 等. 含水率对新近系粉质黏土强度影响的试验研究[J]. 人民黄河, 2016, 38(4): 125-128.
Xue Z S, Cheng Y Y, Cui K W, et al. Testing study on effects of moisture content on strength of Neogene silty clay[J]. Yellow River, 2016, 38(4): 125-128.
- [6] 杨丰年, 李向群, 王海鹏. 长春地区老黏土地基承载力确定方法的探讨[J]. 地质与资源, 2015, 24(2): 157-159.
Yang F N, Li X Q, Wang H P. Discussion on the determination method of old clay foundation bearing capacity in Changchun region[J]. Geology and Resources, 2015, 24(2): 157-159.
- [7] 涂春霖, 尹林虎, 顾亚. 云南遮放盆地粉质黏土物理力学指标相关性分析[J]. 矿产勘查, 2021, 12(9): 1979-1984.
Tu C L, Yin L H, Gu Y. Correlation analysis on physical and mechanical indexes of the silty clay in Zhefang Basin of Yunnan Province [J]. Mineral Exploration, 2021, 12(9): 1979-1984.
- [8] 王建伟, 佟智强, 刘浩, 等. 牡丹江市主城区粉质黏土物理力学指标相关性分析[J]. 矿产与地质, 2022, 36(6): 1243-1248.
Wang J W, Tong Z Q, Liu H, et al. Correlation analysis of physical and mechanical indexes of silty clay in the main urban area of Mudanjiang City[J]. Mineral Resources and Geology, 2022, 36(6): 1243-1248.
- [9] 韩素君. 北京地区土工试验成果及综合分析[J]. 岩土工程技术, 2019, 33(1): 40-45, 48.
Han S J. The comprehensive analysis of the soil test results in Beijing area[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2019, 33(1): 40-45, 48.
- [10] 何险高, 李建常, 汪凌. 美标欧标和国标关于土工试验成果分析研究[J]. 山西建筑, 2020, 46(15): 51-53.
He X G, Li J C, Wang L. Analysis and research on soil test results by American standard, European standard and Chinese standard[J]. Shanxi Architecture, 2020, 46(15): 51-53.
- [11] 郭海朋, 杨祥宇, 王云龙, 等. 廊坊沉降区深层黏性土压缩指数相关性分析[J]. 土木工程与管理学报, 2022, 39(2): 32-37.
Guo H P, Yang X Y, Wang Y L, et al. Correlation analysis of compression index of deep clayey soil in the settlement area of Langfang City [J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2022, 39(2): 32-37.
- [12] 寇晓岚, 齐芳云, 李双柏. 黄土地区土工试验成果分析[J]. 勘测设计, 2013(4): 20-23.
Kou X L, Qi F Y, Li S B. Experience of soil test data analysis in loess region[J]. Electric Power Survey & Design, 2013(4): 20-23.
- [13] 王丽, 梁鸿. 含水率对粉质粘土抗剪强度的影响研究[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2009, 30(1): 170-174, 195.
Wang L, Liang H. The influence of the water ratio on the shearing strength of silty clay [J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition), 2009, 30(1): 170-174, 195.
- [14] 尧俊凯, 陈锋, 闫宏业, 等. 东北地区粉质黏土湿陷系数与物理性质指标的相关性[J]. 铁道建筑, 2019, 59(2): 50-53.
Rao J K, Chen F, Yan H Y, et al. Correlation between collapsibility coefficient and physical properties of silty clay in Northeast China[J]. Railway Engineering, 2019, 59(2): 50-53.
- [15] 孙峰. 沈阳浅层粉质黏土承载力与浅基础地基承载力[J]. 岩土工程技术, 2016, 30(6): 293-297.
Sun F. Research on bearing capacity of shallow silty clay and shallow foundation in Shenyang [J]. Geotechnical Engineering Technique, 2016, 30(6): 293-297.
- [16] 罗红, 唐红梅. 重庆库区滑带粉质黏土强度参数相关性研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2019, 28(1): 80-83, 138.
Luo H, Tang H M. Correlation study on strength parameters of slide surface silty clay of landslide in Chongqing reservoir area[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Sciences), 2019, 28(1): 80-83, 138.
- [17] 陈井胜, 邢德和, 刘森, 等. 辽宁辽阳地区辽河群酸性火山岩锆石 U-Pb 年代学及其地质意义[J]. 岩石学报, 2017, 33(9): 2792-2810.
Chen J S, Xing D H, Liu M, et al. Zircon U-Pb chronology and geological significance of felsic volcanic rocks in the Liaohu Group from the Liaoyang area, Liaoning Province [J]. Acta Petrologica Sinica, 2017, 33(9): 2792-2810.

- the host rock of Woxi Au-Sb-W deposit [J]. *Mining Technology*, 2013, 13(6): 143-144. (in Chinese)
- [17] Pour A B, Hashim M. Identification of hydrothermal alteration minerals for exploring of porphyry copper deposit using ASTER data, SE Iran [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2011, 42(6): 1309-1323.
- [18] 杨佳佳, 冯雨林, 徐英奎, 等. 基于多源遥感数据的成矿远景区圈定——以内蒙古东乌珠穆沁-满都地区为例 [J]. *地质与资源*, 2015, 24(1): 51-56.
- Yang J J, Feng Y L, Xu Y K, et al. Delineation of metallogenic prospects based on multi-source remote sensing data: A case study of Dong Ujimqin-Mandu region, Inner Mongolia [J]. *Geology and Resources*, 2015, 24(1): 51-56.
- [19] 曹晓明, 周贤旭, 钟浩. “就矿找矿”的认识与实践 [J]. *东华理工大学学报: 自然科学版*, 2011, 34(1): 51-56.
- Cao X M, Zhou X X, Zhong H. The cognition and the practice of ore-prospecting nearby the existing deposits [J]. *Journal of East China Institute of Technology (Natural Science)*, 2011, 34(1): 51-56.
- [20] 李志忠, 穆华一, 刘德长, 等. “遥感先行”服务自然资源调查技术变革与调整 [J]. *地质与资源*, 2021, 30(2): 153-160.
- Li Z Z, Mu H Y, Liu D C, et al. Remote sensing first: Service for the technological revolution and innovation in natural resources survey. *Geology and Resources*, 2021, 30(2): 153-160.
- [21] 陈勇敢, 韩先菊, 张慧玉, 等. 基于混合像元分解提取多种类覆盖区遥感蚀变信息——以甘肃省岷县寨上金矿区为例 [J]. *地质与勘*
- 探, 2011, 47(6): 1171-1176.
- Chen Y G, Han X J, Zhang H Y, et al. Extracting remote sensing alteration information from areas with various covers based on decomposition of mixed pixels: An example of the Zhaishang gold mine in Min County of Gansu Province [J]. *Geology and Exploration*, 2011, 47(6): 1171-1176.
- [22] 路轩轩, 朱谷昌, 邹林, 等. 植被覆盖区的遥感蚀变信息提取研究——以老挝南部某金矿区为例 [J]. *遥感信息*, 2014, 29(5): 85-89.
- Lu X X, Zhu G C, Zou L, et al. The extraction of alteration information with remote sensing image of vegetation coverage area: A case study of the gold mine in southern Laos [J]. *Remote Sensing Information*, 2014, 29(5): 85-89.
- [23] 尹展, 张利军, 段建良, 等. 南方植被区强迫不变植被抑制技术改进与应用 [J]. *国土资源遥感*, 2019, 31(2): 82-88.
- Yin Z, Zhang L J, Duan J L, et al. Improvement and application of forced invariance vegetation suppression in southern vegetation area [J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2019, 31(2): 82-88.
- [24] 吕利利, 颀耀文, 黄晓君, 等. 基于 CART 决策树分类的沙漠化信息提取方法研究 [J]. *遥感技术与应用*, 2017, 32(3): 499-506.
- Lv L L, Xie Y W, Huang X J, et al. Desertification information extraction method research based on the CART decision tree classification [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2017, 32(3): 499-506.

(上接第 253 页/Continued from Page 253)

- [18] 孙岐发, 田辉, 张扩. 下辽河平原地区历史地面沉降情况研究 [J]. *地质与资源*, 2014, 23(5): 450-452.
- Sun Q F, Tian H, Zhang K. Study on the history of land subsidence in Lower Liaohe River Plain [J]. *Geology and Resources*, 2014, 23(5): 450-452.
- [19] 廖秋凤. 土工试验中应注意的问题及试验成果综合分析 [J]. *四川建材*, 2020, 46(12): 80-81.
- Liao Q F. Issues that should be paid attention to in geotechnical tests and comprehensive analysis of test results [J]. *Sichuan Building Materials*, 2020, 46(12): 80-81. (in Chinese)
- [20] 姚仁, 杜立志, 吕宇航, 等. 长春地区粉质黏土导热系数与其物性参数相关性研究 [J]. *世界地质*, 2018, 37(3): 976-981.
- Yao R, Du L Z, Lyu S H, et al. Correlation between thermal conductivity and physical properties of silty clay in Changchun area [J]. *Global Geology*, 2018, 37(3): 976-981.
- [21] 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(S2): 645-653, 659.
- Tang J P, He G D, Fu X, et al. Study on the relevance between the physico-mechanical parameters of foundation soft clay of Foshan [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2018, 14(S2): 645-653, 659.