

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2023.07.017

基于静力触探估算粉土物理力学性质指标的方法

吴道祥¹, 郭佳诚¹, 叶磊¹, 赵华宏^{2,3}, 吴磊磊^{2,3}

(1. 合肥工业大学 资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 安徽省交通规划设计研究总院股份有限公司, 安徽 合肥 230088; 3. 公路交通节能与环保技术及装备交通运输行业研发中心, 安徽 合肥 230088)

摘要:针对粉土类取样和制样难度较大的土层,文章利用静力触探(cone penetration test, CPT)比贯入阻力 p_s 数据,结合地区经验确定土层物理力学性质指标,通过收集整理安徽省淮北平原200余份工程勘察资料,统计计算淮北平原地区粉土 p_s 值的算术平均值、厚度加权平均值和最小平均值,分析 p_s 值3种统计平均值与各常用物理力学性质指标的统计学特征和相关性,并逐一进行回归拟合分析和检验。结果表明:安徽淮北平原粉土 p_s 值3种统计平均值的统计学特征无显著差异,而各物理力学性质指标的统计学特征各异;相应地,3种统计平均值与各指标之间的相关性和拟合回归效果也差异明显;除含水率等含水状态指标外,3种统计平均值与其余各常用物理力学性质指标具有高度相关性,回归拟合效果良好; p_s 值最小平均值与各主要物理力学性质指标的相关性最高,回归拟合效果最优。经显著性检验后,文中建议对于淮北平原粉土,可采用比贯入阻力最小平均值,按照文中建立的回归方程确定主要物理力学性质指标。

关键词:静力触探(CPT);比贯入阻力;物理力学性质指标;粉土;安徽淮北平原;经验公式

中图分类号:TU413.9;TU470.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2023)07-0972-07

Method for estimating physical and mechanical properties indexes of silt by CPT

WU Daoxiang¹, GUO Jiacheng¹, YE Lei¹, ZHAO Huahong^{2,3}, WU Leilei^{2,3}

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Anhui Transport Consulting and Design Institute Co., Ltd., Hefei 230088, China; 3. Research and Development Center on Technology and Equipment for Energy Conservation and Environmental Protection of Highway Transport, Hefei 230088, China)

Abstract: In view of the fact that silt is a kind of soil layer with great difficulty in sampling and sample preparation, cone penetration test(CPT) was applied to determining the physical and mechanical properties indexes of soil layer combined with regional experiences. More than 200 geotechnical engineering investigation data of Huaibei Plain of Anhui Province were collected, and the arithmetic average, thickness weighted average and minimum average of specific penetration resistance(p_s) of silty soils in Huaibei Plain area were statistically calculated. Then, the statistical characteristics of these three statistical averages and common physical and mechanical properties indexes as well as the correlation between them were analyzed, and regression fitting analysis and tests were carried out one by one. The results show that there is no significant difference in the statistical characteristics of these three statistical averages, but the statistical characteristics of the physical and mechanical properties indexes are different; and accordingly, the correlation between these three statistical averages and each index and the regression fitting effect are also significantly different; except for water content and other moisture condition indexes, these three statistical averages are highly correlated with other commonly used physical and mechanical properties indexes, and the regression fitting effect is good; the correlation between the minimum average of p_s and the main physical and mechanical properties indexes is the

收稿日期:2022-04-08;修回日期:2022-05-16

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41002117);合肥工业大学产学研校企合作资助项目(W2019JSFW0733)

作者简介:吴道祥(1975—),男,湖北洪湖人,合肥工业大学副教授,硕士生导师;

赵华宏(1975—),男,陕西丹凤人,安徽省交通规划设计研究总院股份有限公司正高级工程师。

highest, and the regression fitting effect is the best. Based on the significance tests, it is suggested that the minimum average of specific penetration resistance can be used to determine the main physical and mechanical properties indexes of silty soils in Huaibei Plain of Anhui Province according to the regression equations established in this paper.

Key words: cone penetration test(CPT); specific penetration resistance; physical and mechanical property index; silt; Huaibei Plain of Anhui Province; empirical formula

岩土体物理力学性质指标是岩土工程分析评价和设计计算的基础,室内土工试验是获取岩土体物理力学性质指标的基本方法之一,但由于试验周期、取样扰动及数量限制等问题,工程中很多时候也需要一些其他快速、有效的确定方法,特别是对于粉土等取样和制样难度较大的土层,更是如此。静力触探(cone penetration test, CPT)作为一种使用最广泛的原位测试方法,具有测试连续、快速、精度高等特点,在工程中常被用于确定土体各类性质参数和指标^[1-2]。利用 CPT 确定土体物理力学性质指标的可靠性和适用性得到了广泛的认可,在很多规范、手册中都列有相关规定^[3-7]。

粉土工程性质介于砂土和黏性土之间,具有黏聚力低、成型质量差、渗透性好、保水性差等特点^[8]。研究人员对不同地区粉土的工程性质做了大量的研究工作。文献[9]对江苏徐宿地区粉土进行研究,提出加固方法;文献[10]对上海大量工程数据进行统计,分析浅层粉土渗透性与各项土体参数的关系;文献[11]对昆明盆地粉土的物理力学性质进行分析,探讨区域性粉土的特性及工程应用;文献[12]对比研究黄河冲积粉土不同密实度、含水率对粉土力学性质的影响;文献[13]在部分排水条件下对丹麦北部地区粉土进行 CPT 试验,探讨测试成果与相对密度等指标的关系;文献[14]利用 CPT 研究排水条件对不同细粒含量液化土层的工程性质和液化潜力的影响。上述研究结果表明,不同地区的粉土具有区域性特点,利用 CPT 对区域性粉土的物理力学性质指标进行分析和确定具有重要的研究意义和工程应用价值。

安徽省淮北平原位于安徽省最北端,包括亳州市、淮北市、阜阳市、宿州市以及淮南市和蚌埠市部分地区。淮北平原是黄河、淮河泛滥作用形成的冲积平原,地势平坦开阔,由丰厚的第四纪堆积物组成,呈典型的堆积性地貌景观,仅分布少量低山、丘陵^[15-17];地表普遍分布厚层黏性土、粉土及砂土等土层,CPT 在该区得到普遍应用,积累了大量的数据和丰富的经验。粉土在该区分布广泛,厚度和埋藏深度不一,状态和性质变化也较

大,是该区主要第四系土层之一。本文收集整理安徽省淮北平原 200 余份工程勘察资料,对收集的研究区粉土 CPT 和室内土工试验数据进行统计分析和回归拟合,建立两者之间的经验公式,以期提高勘察效益、为该区工程建设提供参考。

1 静力触探数据统计分析

1.1 数据来源与分布

本文收集的工程资料来源于安徽省内几家大型勘察设计单位,数据资料可靠。经整理,共取得可供分析研究的工程 200 余项,分布在阜阳、亳州、淮北等淮北平原各区县,涵盖整个安徽淮北平原地区,确保研究成果具有较好的代表性和地区适用性。

1.2 数据统计计算及统计学特性

1.2.1 异常数据剔除

采用文献[18]的方法剔除异常数据:将比贯入阻力 p_s 值由小到大以 1 MPa 为区间划分为若干个区段,每个区段内土体的状态和工程性质较为接近,对各分段测试值进行频数分析,设置 95% 的置信区间,剔除超出此置信区间的数值。实际操作表明,该处理方法能有效提高拟合效果。

1.2.2 数据统计计算方法

单桥 CPT 的测试参数为 p_s ,在统计计算和分析时,应根据土层厚度及其工程特性选择适宜的 p_s 值统计计算方法^[3-5]。本文分别统计计算研究区粉土 p_s 值的算术平均值 $\bar{p}_{s,s}$ 、厚度加权平均值 $\bar{p}_{s,h}$ 和最小平均值 $\bar{p}_{s,min}$ ^[18-19],将其与粉土的常用物理力学性质指标建立经验公式,并对拟合结果进行比对,探讨不同统计计算方法在该地区的适用性,最后对回归公式进行显著性检验^[20]。

1.2.3 p_s 值与常用指标的统计学特征

研究区粉土 p_s 值及其常用物理力学性质指标的统计学特征见表 1 所列,如图 1 所示。

1) 安徽淮北平原粉土 p_s 值的 3 种统计平均值均呈正偏态分布,其频率分布、离散程度等都非常接近,变异系数为 0.44~0.47,表明其统计学特征无显著差异。

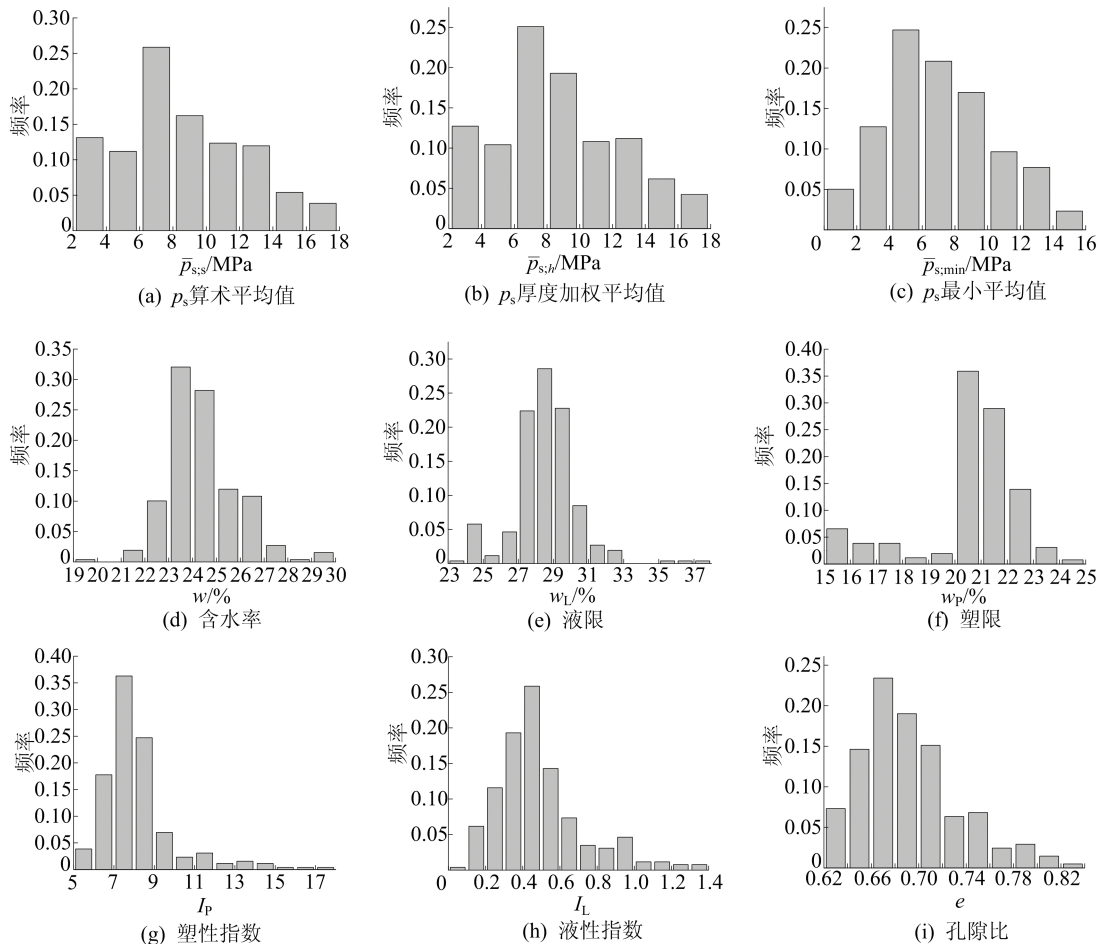
2) 从统计数据看,研究区粉土的 w 在 19.50%~29.50%之间,平均值为 24.334%,绝大部分介于 20%~30%之间,湿度状态为“湿”;含水率 w 、液限 w_L 、塑限 w_P 等含水性指标的分布均较为集中,其中, w 、 w_L 近似呈正态分布。

3) 研究区粉土孔隙比 e 介于 0.62~0.84 之间,平均值为 0.691,绝大部分小于 0.75,密实度

为“密实”。粉土与黏性土的物质成分及工程性质差异较大,密实度对其工程性质的影响较大,从统计数据看,研究区粉土的力学性质指标黏聚力 c 、内摩擦角 φ 和压缩模量 E_s 等,它们的分布主要集中在较大值区间,呈典型的负偏态分布,如 c 介于 (20, 26] kPa 的占比超过 80%,而介于 (10, 20] kPa 占比则仅为 15%左右。

表 1 研究区粉土 p_s 值、常用物理力学性质指标的统计学特征

统计项目	参数单位	样本数	最小值	最大值	平均值	标准差	方差	变异系数
p_s 算术平均值	MPa	259	2.09	17.71	8.553	3.809	14.508	0.45
p_s 厚度加权平均值	MPa	259	2.18	17.71	8.693	3.804	14.472	0.44
p_s 最小平均值	MPa	259	1.71	15.82	7.088	3.326	11.062	0.47
含水率	%	259	19.50	29.50	24.334	1.503	2.260	0.06
液限	%	259	23.70	37.10	28.520	1.792	3.212	0.06
塑限	%	259	15.13	24.50	20.441	1.973	3.891	0.10
液限指数		259	0.08	1.33	0.486	0.236	0.056	0.48
塑性指数		259	5.50	17.00	8.089	1.823	3.323	0.23
孔隙比		205	0.62	0.84	0.691	0.041	0.002	0.06
重度	kN/m ³	202	18.30	20.10	19.476	0.411	0.169	0.02
黏聚力	kPa	199	11.10	27.30	21.903	3.502	12.264	0.16
内摩擦角	°	208	12.50	37.68	31.318	5.313	28.225	0.17
压缩模量	MPa	253	5.50	15.00	12.030	2.754	7.585	0.23
压缩系数	MPa ⁻¹	239	0.10	0.31	0.140	0.046	0.002	0.33



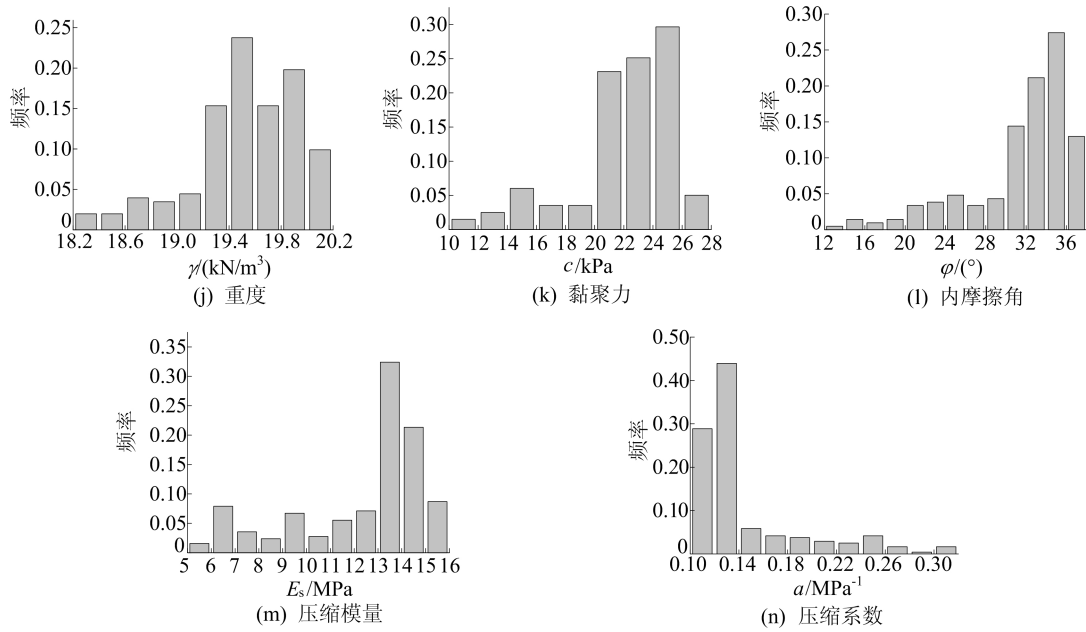


图 1 研究区粉土 p_s 值、常用物理力学性质指标频率分布直方图

压缩系数 a 与 E_s 存在倒数关系,其分布主要集中在小值区间,在 $0.10 \sim 0.14 \text{ MPa}^{-1}$ 的占比超过 70%,呈典型正偏态分布;与密实度高度相关的另一个物理性质指标 γ 也呈现类似规律,在 $(19.2, 20.2] \text{ kN/m}^3$ 的占比超过 80%,而在 $(18.2, 19.2] \text{ kN/m}^3$ 的占比不到 20%,呈正偏态分布。

2 CPT 估算物理力学性质指标方法研究

2.1 p_s 值与常用指标间的相关性分析

在对两变量进行回归拟合、建立经验公式之前,需要衡量和评价两变量之间是否具有相关性

及相关程度。本文通过 SPSS 软件对淮北平原粉土 p_s 值 3 种统计平均值与常用物理力学性质指标相关性进行分析,结果见表 2 所列。

1) 研究区粉土 p_s 值 3 种统计平均值与各含水状态指标,如 w, w_L, w_P, I_L 和 I_P 等的 Pearson 相关系数 $|r|$ 均较小,相关性弱。

2) 研究区粉土 p_s 值 3 种统计平均值与 e, γ 等物理性质指标,以及 c, ϕ, a 和 E_s 等力学性质指标的相关系数 $|r|$ 都较大,均大于 0.600,且与这些指标的显著性 P 均为 0,表明 p_s 值 3 种统计平均值与这些物理力学性质指标呈高度相关。

表 2 研究区粉土 p_s 值 3 种统计平均值与常用物理力学性质指标相关性分析结果

物理力学性质指标	p_s 值统计平均值	Pearson 相关系数 $ r $	显著性 (双尾) P	物理力学性质指标	p_s 值统计平均值	Pearson 相关系数 $ r $	显著性 (双尾) P
w	$\bar{p}_{s;s}$	0.347	0	γ	$\bar{p}_{s;s}$	0.680	0
	$\bar{p}_{s;h}$	0.350	0		$\bar{p}_{s;h}$	0.668	0
	$\bar{p}_{s;\min}$	0.348	0		$\bar{p}_{s;\min}$	0.687	0
w_L	$\bar{p}_{s;s}$	0.198	0.001	c	$\bar{p}_{s;s}$	0.680	0
	$\bar{p}_{s;h}$	0.204	0.001		$\bar{p}_{s;h}$	0.685	0
	$\bar{p}_{s;\min}$	0.196	0.002		$\bar{p}_{s;\min}$	0.681	0
w_P	$\bar{p}_{s;s}$	0.001	0.990	ϕ	$\bar{p}_{s;s}$	0.628	0
	$\bar{p}_{s;h}$	0.021	0.741		$\bar{p}_{s;h}$	0.616	0
	$\bar{p}_{s;\min}$	0.018	0.769		$\bar{p}_{s;\min}$	0.634	0
I_L	$\bar{p}_{s;s}$	0.211	0.001	E_s	$\bar{p}_{s;s}$	0.706	0
	$\bar{p}_{s;h}$	0.202	0.001		$\bar{p}_{s;h}$	0.702	0
	$\bar{p}_{s;\min}$	0.221	0		$\bar{p}_{s;\min}$	0.723	0
I_P	$\bar{p}_{s;s}$	0.206	0.001	a	$\bar{p}_{s;s}$	0.625	0
	$\bar{p}_{s;h}$	0.190	0.002		$\bar{p}_{s;h}$	0.619	0
	$\bar{p}_{s;\min}$	0.225	0		$\bar{p}_{s;\min}$	0.628	0
e	$\bar{p}_{s;s}$	0.737	0				
	$\bar{p}_{s;h}$	0.729	0				
	$\bar{p}_{s;\min}$	0.743	0				

3) 研究区粉土 p_s 值 3 种统计平均值与各指标的相关性彼此相差不大, 显示出 p_s 值的不同统计平均值与各物理力学性质指标之间的相关性均较为接近, 没有显著差异; 但 $\bar{p}_{s,\min}$ 除了与 c 的相关系数 $|r|$ 略小于 $\bar{p}_{s,h}$ 值外, 与其余各指标的相关系数 $|r|$ 总是最大, 相关程度总是最高。

2.2 p_s 值与常用指标间的回归分析

本文绘制研究区粉土 p_s 值 3 种统计平均值和常用物理力学性质指标的关系散点图, 并根据 2.1 节相关性分析结果和散点图特征, 逐一进行一元线性、非线性回归分析。对比后发现, 研究区粉土 p_s 值 3 种统计平均值与各物理力学性质指标之间可统一采用函数 $y=a+b/x$ 的形式进行拟合, 效果良好, 也便于工程应用; 回归拟合结果见表 3 所列, 如图 2 所示。

从 2.1 节分析可以看出, 研究区粉土 p_s 统计平均值与各含水状态指标的相关程度极弱, 而回归拟合结果也显示它们的拟合优度极低, 拟合效果差, 因此表 3、图 2 中没有给出相应的拟合结果。

p_s 的 3 种统计平均值与常用物理力学性质

指标回归拟合方程的拟合优度 R^2 变化范围分别为: $\bar{p}_{s,s}$, 0.58~0.69; $\bar{p}_{s,h}$, 0.56~0.67; $\bar{p}_{s,\min}$, 0.62~0.73。

表 3 p_s 值 3 种统计平均值与常用物理力学性质指标的拟合方程

物理力学性质指标	拟合方程	拟合优度 R^2
e	$e=0.64+0.33/\bar{p}_{s,s}$	0.58
	$e=0.64+0.33/\bar{p}_{s,h}$	0.56
	$e=0.64+0.26/\bar{p}_{s,\min}$	0.62
γ	$\gamma=20.04-3.71/\bar{p}_{s,s}$	0.60
	$\gamma=20.02-3.65/\bar{p}_{s,h}$	0.57
	$\gamma=20.01-2.81/\bar{p}_{s,\min}$	0.62
c	$c=26.42-29.83/\bar{p}_{s,s}$	0.58
	$c=26.40-29.97/\bar{p}_{s,h}$	0.59
	$c=26.26-22.97/\bar{p}_{s,\min}$	0.62
φ	$\varphi=38.16-44.23/\bar{p}_{s,s}$	0.60
	$\varphi=37.96-43.93/\bar{p}_{s,h}$	0.56
	$\varphi=37.83-33.83/\bar{p}_{s,\min}$	0.63
E_s	$E_s=15.84-24.33/\bar{p}_{s,s}$	0.69
	$E_s=15.79-24.54/\bar{p}_{s,h}$	0.67
	$E_s=15.66-18.61/\bar{p}_{s,\min}$	0.72
a	$a=0.078+0.400/\bar{p}_{s,s}$	0.68
	$a=0.079+0.402/\bar{p}_{s,h}$	0.66
	$a=0.080+0.311/\bar{p}_{s,\min}$	0.73

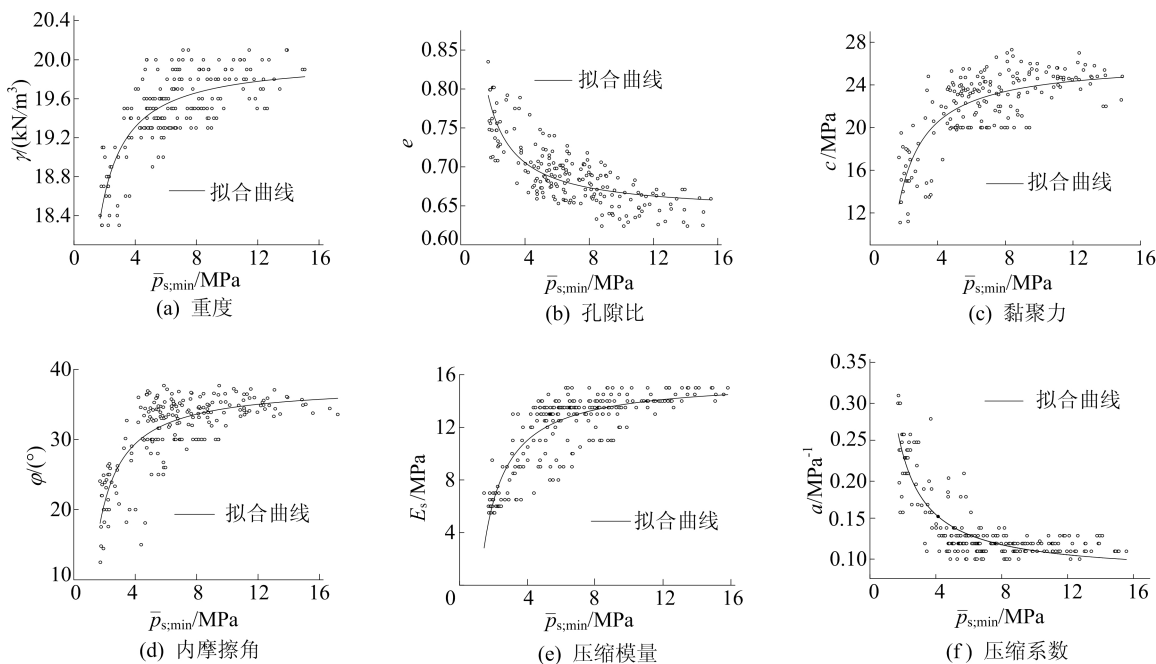


图 2 研究区粉土 $\bar{p}_{s,\min}$ 与常用物理力学性质指标关系散点图和拟合曲线

由表 3、图 2 可知: 淮北平原粉土 p_s 值的 3 种统计平均值与除含水状态指标外的各常用物理力学性质指标的回归拟合优度 R^2 都较大, 拟合效果良好, 其中与 a 、 E_s 的拟合效果最好, R^2 最高; 而 3 种统计平均值中, $\bar{p}_{s,\min}$ 与各指标的 R^2 总是

最大, 拟合效果最好。因此, 本文建议安徽淮北平原粉土采用 CPT 成果确定其物理力学性质指标时可采用 $\bar{p}_{s,\min}$ 。

2.3 拟合回归方程的检验

拟合回归方程必须进行必要的检验, 以确定

其可靠性和适用性,本文对各拟合回归方程采取 3 种检验方法,分别是 t 检验、F 检验以及 r 检验。本文建立的经验公式都是非线性方程 $y=a+b/x$ 的形式,检验前可将其转换为线性方程的形式,令 $x'=1/x$,回归方程变为 $y=a+bx'$,再对各方程进行检验。安徽淮北平原粉土 $\bar{p}_{s,\min}$ 与常用物理力学性质指标回归拟合方程的显著性检验结果见表 4 所列。

由表 4 可知:研究区粉土 $\bar{p}_{s,\min}$ 与各常用物理力学性质指标的回归拟合方程均有 $r > r_{0.05}$ 、 $F > F_{0.05}$ 、 $|t| > t_{0.025}$,且显著性为 0,说明回归效果显著,具有 95% 置信度,通过了可靠性检验。因此,可按本文建立的比贯入阻力最小平均值 $\bar{p}_{s,\min}$ 与常用物理力学性质指标的回归拟合方程,根据 CPT 成果确定安徽省淮北平原粉土的常用物理力学性质指标。

表 4 $\bar{p}_{s,\min}$ 与常用物理力学性质指标回归方程显著性检验结果

物理力学 性质指标	r 检验法		F 检验法			t 检验法		
	r	$r_{0.05}$	F	$F_{0.05}$	显著性	t	$t_{0.025}$	显著性
e	0.786	0.066	328.177	3.870	0	18.116	1.960	0
γ	0.788	0.138	326.797	3.870	0	18.078	1.960	0
c	0.787	0.139	320.902	3.870	0	17.914	1.960	0
φ	0.792	0.097	346.470	3.870	0	18.614	1.960	0
E_s	0.848	0.120	640.975	3.870	0	25.317	1.960	0
a	0.853	0.121	630.739	3.870	0	25.115	1.960	0

3 结 论

本文经统计分析、计算及拟合,建立根据 CPT 的 p_s 值确定安徽淮北平原粉土常用物理力学性质指标的经验公式,得到结论如下:

1) 研究区粉土 p_s 值 3 种统计平均值均为正偏态分布,其分布、离散程度等无显著差异。

2) 研究区粉土绝大部分属“密实”状态,重度和各力学性质指标的分布主要集中在较大值区间,呈负偏态分布,而孔隙比和压缩系数的分布主要集中在较小值区间,呈正偏态分布。

3) p_s 值 3 种统计平均值与含水率等含水状态指标的相关程度极弱,而与其各常用物理力学性质指标等均呈高度相关;其中, p_s 值的最小平均值 $\bar{p}_{s,\min}$ 与算术平均值 $\bar{p}_{s,s}$ 、厚度加权平均值 $\bar{p}_{s,h}$ 相比,除 c 外,与其各指标的 Pearson 相关系数 |r| 总是最大,相关程度总是最高。

4) 受相关性等因素影响, p_s 值 3 种统计平均值与研究区粉土含水状态指标的回归拟合优度极低,拟合效果差,而与其各常用物理力学性质指标可统一采用 $y=a+b/x$ 的函数形式进行拟合,且拟合优度都较高,拟合效果均较为良好。其中,与 $\bar{p}_{s,s}$ 、 $\bar{p}_{s,h}$ 相比, $\bar{p}_{s,\min}$ 与各指标的拟合优度总是最高,拟合效果最好,显著性检验结果也表明本文建立的经验公式可靠、适用。

[参 考 文 献]

- [1] 吴道祥,单灿灿,钟轩明,等. 静力触探的发展及其在岩土工程中的应用[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),2008,31(2):211-215.
- [2] 刘松玉,吴燕开. 论我国静力触探技术(CPT)现状与发展[J]. 岩土工程学报,2004,26(4):553-556.
- [3] 中铁第四勘察设计院集团有限公司. 铁路工程地质原位测试规程:TB 10018—2018[S]. 北京:中国铁道出版社,2018:74-79.
- [4] 上海岩土工程勘察设计研究院有限公司. 静力触探技术规程:DG/TJ 08-2189-2015[S]. 上海:同济大学出版社,2015:21-29.
- [5] 《工程地质手册》编委会. 工程地质手册[M]. 5 版. 北京:中国建筑工业出版社,2018:230-238.
- [6] ROBERTSON P K, CABAL K L. Guide to cone penetration testing for geotechnical engineer [M]. 5th ed. Los Angeles: Gregg Drilling & Testing, Inc, 2012:25-90.
- [7] European Committee for Standardization. Eurocode 7-Geotechnical design-Part 2: ground investigation and testing [S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2007:27-41.
- [8] 吴志海. 安徽淮北平原新近沉积粉土工程性质研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2006.
- [9] 朱志铎,刘松玉,孙海军. 江苏徐宿地区粉土的基本特性及加固方法研究[J]. 岩土力学,2004,25(7):1155-1158.
- [10] 魏诚寅. 上海地区浅层粉土渗透性与土体各参数的关系[J]. 地下空间与工程学报,2019,15(6):1714-1718.

(下转第 996 页)

- vances in the structural biology of chondroitin sulfate and dermatan sulfate[J]. *Current Opinion in Structural Biology*, 2003, 13(5):612-620.
- [6] TROWBRIDGE J M, GALLO R L. Dermatan sulfate: new functions from an old glycosaminoglycan[J]. *Glycobiology*, 2002, 12(9):117-125.
- [7] HAN W, WANG W, ZHAO M, et al. A novel eliminase from a marine bacterium that degrades hyaluronan and chondroitin sulfate [J]. *Journal of Biological Chemistry*, 2014, 289(40):27886-27898.
- [8] LI L, LI Y, IJAZ M, et al. Review on complement analysis method and the roles of glycosaminoglycans in the complement system [J]. *Carbohydrate Polymers: Scientific and Technological Aspects of Industrially Important Polysaccharides*, 2015, 134:590-597.
- [9] LIU J, PEDERSEN L C. Anticoagulant heparan sulfate: structural specificity and biosynthesis[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2007, 74(2):263-272.
- [10] ZHANG Q, LI J, LIU C, et al. Protective effects of low molecular weight chondroitin sulfate on amyloid beta (A β)-induced damage in *vitro* and in *in vivo* [J]. *Neuroscience*, 2015, 305:169-182.
- [11] LI Y, CHEN Z Y, ZHOU Z, et al. Expression, purification and characterization of GAPDH-ChSase ABC I from *Proteus vulgaris* in *Escherichia coli* [J]. *Protein Expression and Purification*, 2016, 128:36-41.
- [12] YIN F X, WANG F S, SHENG J Z. Uncovering the catalytic direction of chondroitin AC exolyase: from the reducing end towards the non-reducing end[J]. *Journal of Biological Chemistry*, 2016, 291(9):4399-4406.
- [13] CHEN L, SHI C Q, YIN F X, et al. Cloning and characterization of a chondroitin AC exolyase from *Arthrobacter* sp. SD-04 [J]. *Molecular Biotechnology*, 2019, 61(10):791-800.
- [14] YU Y Y, YE H F, WU D D, et al. Chemoenzymatic quantification for monitoring unpurified polysaccharide in rich medium [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2019, 103(18):7635-7645.
- [15] KIELKOPF C L, BAUER W, URBATSCH I L. Bradford assay for determining protein concentration [J]. *Cold Spring Harb Protoc*, 2020, 2020(4):102-269.
- [16] LAMARI F N, KARAMANOS N K. Structure of chondroitin sulfate[J]. *Advances in Pharmacology*, 2006, 53:33-48.
- [17] RAINSFORD K D. Importance of pharmaceutical composition and evidence from clinical trials and pharmacological studies in determining effectiveness of chondroitin sulphate and other glycosaminoglycans; a critique[J]. *The Journal of Pharmacy and Pharmacology*, 2009, 61(10):1263-1270.
- [18] RODRIGUEZ M L, JANN B, JANN K. Structure and serological characteristics of the capsular K4 antigen of *Escherichia coli* O5:K4:H4, a fructose-containing polysaccharide with a chondroitin backbone[J]. *European Journal of Biochemistry*, 1988, 177(1):117-124.
- [19] SCHIRALDI C, CIMINI D, ROSA M D. Production of chondroitin sulfate and chondroitin[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2010, 87(4):1209-1220.
- [20] LIU J, YANG A H, LIU J, et al. KfoE encodes a fructosyltransferase involved in capsular polysaccharide biosynthesis in *Escherichia coli* K4 [J]. *Biotechnology Letters*, 2014, 36(7):1469-1477.
- [21] LINHARDT R J, AVCI F Y, TOIDA T, et al. CS lyases: structure, activity, and applications in analysis and the treatment of diseases [J]. *Advances in Pharmacology*, 2006, 53:187-215.

(责任编辑 闫杏丽)

(上接第 977 页)

- [11] 阮永芬, 刘岳东. 昆明盆地粉土的特性研究与利用[J]. *岩土力学*, 2003, 24(增刊 1):199-202.
- [12] 肖军华, 刘建坤, 彭丽云, 等. 黄河冲积粉土的密实度及含水率对力学性质影响[J]. *岩土力学*, 2008, 29(2):409-414.
- [13] HOLMSGAAARD R, NIELSEN B N, IBSEN L B. Interpretation of cone penetration testing in silty soils conducted under partially drained conditions[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2016, 142(1):1-10.
- [14] KRAGE C P, DEJONG J T. Influence of drainage conditions during cone penetration on the estimation of engineering properties and liquefaction potential of silty and sandy soils[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2016, 142(11):1-10.
- [15] 段海澎, 余飞, 戴张俊, 等. 淮北平原浅表层沉积土承载力特征及其螺旋板检测评定方法研究[J]. *工程地质学报*, 2013, 21(1):158-165.
- [16] 余亚男, 余飞, 戴张俊, 等. 淮北平原典型地质体成因规律及工程影响分析[J]. *科学技术与工程*, 2012, 12(5):1001-1006.
- [17] 金权. 安徽淮北平原第四系[M]. 北京:地质出版社, 1990:9-12.
- [18] 吴磊磊, 吴道祥, 叶磊, 等. 静力触探估算安徽省沿江平原黏性土物理力学性质指标方法研究[J]. *合肥工业大学学报(自然科学版)*, 2020, 43(11):1521-1528.
- [19] 赵华宏, 吴道祥, 叶磊, 等. 利用 CPT 确定安徽省沿江丘陵平原黏性土地基承载力的方法研究[J]. *合肥工业大学学报(自然科学版)*, 2020, 43(10):1362-1369.
- [20] 凌能祥, 李声闻, 宁荣健. 数理统计[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社, 2014:176-180.

(责任编辑 张淑艳)