

豫中地区粉质黏土物理力学性质与标贯击数分析

宋国文, 李大华

(安徽建筑大学 土木工程学院, 安徽 合肥 230601)

摘要: 标准贯入试验是一种原位测试方法, 在岩土勘察活动中经常使用, 来判断土体的物理力学指标。通过室外标准贯入试验和室内土工试验分析了豫中平原地区粉质黏土的部分物理力学指标。运用一元线性回归方程拟合了该地区粉质黏土部分物理力学指标与标准贯入击数之间的线性关系, 通过 F 检验相关性显著。研究表明: 豫中平原地区粉质黏土的孔隙比 e 和液性指数 I_L 与标贯击数存在显著的负向线性相关, 压缩模量 E_s 、粘聚力 c 、内摩擦角 φ 以及塑性指标 I_p 与标贯击数存在显著的正向线性相关。研究成果可用于该地区岩土工程勘察, 降低工程建设成本, 提高工作效率以及建立的线性表达式来预测当地粉质黏土的部分物理力学指标。

关键词: 标准贯入试验; 室内土工试验; 粉质黏土

中图分类号: TU41

文献标识码: A

文章编号: 2095-8382 (2021) 04-035-06

Analysis of Physical and Mechanical Properties and Standard Penetration Number of Silty Clay in Central Henan

SONG Guowen, LI Dahua

(School of civil engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, China)

Abstract: Standard penetration test is a kind of in-situ test method, which is often used in geotechnical investigation activities to judge the physical and mechanical indexes of soil. Based on the data of outdoor standard penetration test and indoor geotechnical test, some physical and mechanical indexes of silty clay in central Henan Plain are analyzed. Linear regression equation was used to fit the linear relationship between some physical and mechanical indexes of silty clay and SPT in this area, and the correlation was significant through F test. The results show that the void ratio e and liquid index I_L of silty clay in the central Henan plain have significant negative linear correlation with SPT blow count, while the compressive modulus E_s , cohesion c , internal friction angle φ and plastic index I_p have significant positive linear correlation with SPT blow count. The research results can reduce the cost of geotechnical engineering investigation and construction, improve the work efficiency, and establish a linear expression to predict some physical and mechanical indexes of local silty clay.

Keywords: standard penetration test; indoor geotechnical test; silty clay

标贯试验是使用一定质量的穿心锤从规定的高度自由落体运动, 将一定规格的贯入仪打入土层中, 记下贯入仪打入一定深度所需要的锤击数来确定土体的部分物理力学指标^[1-2], 是岩土工程勘察中最常用的一种原位测试方法。我国在岩土勘察

活动中应用较广泛^[3-4], 例如利用标贯击数可判断土体的密实程度、土体的液化、地基承载力等一些土的物理力学性质。

在相关规范中已经制定了一些地区的标准贯入锤击数 N 与土的压缩模 E_s 量、粘聚力 c 及内摩

收稿日期: 2021-03-15

基金项目: 国家重点研发计划 (2016YFC0701500)

作者简介: 宋国文 (1994-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 工程结构现代施工技术。

擦角 φ 等土的物理力学参数之间的关系式,这些关系式仅仅只适合于局部地区,不能被普遍使用。由于土是岩石在悠久的地质年代里,经受各种复杂的物理和化学等作用所形成的松软物质。因此,土的种类及其物理、力学属性都是千差万别的。但在相同地质时期的年代与相似沉积的条件下,又具备了性状相似的特征。又由于我国的国土面积广袤,地理环境复杂,气候种类多样化,形成土的资源种类繁多性质也十分复杂。即使同一种土质,不同区域土的各种物理力学特征也会存在着很大的差异。因此,国内学者针对不同地区土层的标准贯入击数 N 与土的物理力学参数进行了大量的探索和研究,分析出了它们之间的相关性,建立了不同地区之间的线性表达式^[5-12]。例如湖北省水利电力勘测设计院、武汉城市规划设计院及西南综合勘察院分别建立了局部地区标贯击数与压缩模量 E_s 和变形模量 E_0 的线性关系式。国外标准贯入试验在岩土勘察活动中也得到广泛的研究和应用。一些国外学者利用标准贯入击数对土的物理力学性质进行客观评估^[13-14]。通过数据整理和分析,利用标准击数推算出土的物理力学参数,估算砂性土的内摩擦角、黏性土的内聚力、软岩的平均强度、土的变形模量、地基承载力及估算桩基承载力等等。

依据对豫中平原地区某道路工程详勘阶段钻探成果进行综合研究,对该地区粉质黏土层进行工程特性分析,建立了该地区粉质黏土部分物理力学参数与标贯击数的关系式。为当地的岩土勘察活动积累了经验,提高了野外勘察活动效率,给当地工程建设降低成本,也可以定量预测当地粉质黏土性质。

1 标准贯入试验

1.1 设备组成及设备规格

该试验设备由一定规格的贯入器、钻杆及落锤等部分组成。具体试验的设备和参数要求,如表 1 所示。

1.2 试验要点

(1) 用钻机钻至试土层下面 15 cm 处的试验土层,清除周边浮土和残土,注意保护试验土层受到外界环境干扰。清孔后换用标准贯入器,并测量孔深。

(2) 将落锤自由落体,落体高度 $76 \text{ cm} \pm 2$ 进行

击打,在导杆上涂一些润滑剂减少导向杆与落锤间的摩擦力,还要防止击打的时候杆与锤的偏心和摇摆,保持设备连接之间的垂直度不能有较大倾斜。

(3) 易于每分钟 15-30 的击打数速度将试验设备打入试验土层中,预先在试验土层中先将设备打入 15 cm,不计试验击数。之后将试验设备打入试验土层中 30 cm,记录落锤次数 N 。如果遇见密实度较大的试验土层,设备打入试验土层未到试验所要求的深度而落锤次数超过 50 次时,应立即停下试验,记录实际设备贯入土层的深度 Δs 和落锤的次数 N 。

换下式 (1) 换算成贯入 30 cm 击数 N :

$$N = \frac{30n}{\Delta s} \tag{1}$$

(4) 取出试验段中所采取的土层,进行野外鉴别描述。之后将所采取的土样进行保存以备做试验用。

表 1 标准贯入器设备规格

设备	参数	要求
落锤	落锤的质量 (kg)	63.5
落锤	落距 (cm)	76 ± 2
贯入器对开管	长度 (mm)	> 500
贯入器对开管	外径 (mm)	51 ± 1
贯入器对开管	内径 (mm)	35 ± 1
贯入器管靴	长度 (mm)	50~76
贯入器管靴	刃口角度 ($^\circ$)	18~20
贯入器管靴	刃口单刃厚度 (mm)	1.6
钻杆	直径 (mm)	42/50
钻杆	相对弯曲	$< 1/1\ 000$

1.3 N 值的修正

根据相关规范规定,当杆长为 3 m 至 21 m 时,落锤击数 N 值应按公式 (2) 进行修正:

$$N = \alpha \cdot N' \tag{2}$$

N : 杆长修正值的锤落击数; N' : 实际落锤击数; α : 杆长修正参数,见表 2。

表 2 杆长修正参数 α

杆长度 L (m)	≤ 3	6	9	12	15	18	21
α	1	0.92	0.86	0.81	0.77	0.73	0.70

2 豫中平原地区粉质黏土物理力学性质分析

通过对河南省许昌市某道路工程详勘阶段钻探成果进行综合分析。此工程地处于华北平原河南省中部区域,总体地势东南边低,西北边高。

地表较平坦,被第四系全新统地层覆盖,厚度大约在 200 m,地层含地下水,基岩含有裂隙水。

该地区地基土以下 0~20 m 分为 3 个主要层次:杂填土、粉土和粉质黏土。(1)杂填土:主要由建筑垃圾组成,土质不均;(2)粉土:黄褐色,稍密,稍湿,含零星铁锰质斑或含少量钙质结核,震摇反应中等,干强度低,韧性低;(3)粉质黏土:黄褐色或灰褐色,可塑或硬塑,含少量钙质结核或零星铁锰质斑,刀切面稍光泽,干强度中等,韧性中等,无震摇反应。局部土层地下 7.6~9.5 m 处夹零星贝壳碎屑。

本工程进行的试验包括室外标准贯入试验和室内土工试验,确定了豫中地区的地基土层大致为第四系全新统人工杂填土、冲积和洪积形成的粉土和粉质黏土。表 3 总结了豫中地区地基土层的情况。

2.1 该地区粉质黏土部分物理力学参数范围值

通过室内土工试验数据整理得到该地区粉质黏土物理力学参数,见表 4 和表 5。该地区粉质黏土含水率在 17.9%~28%,含水率比较高。饱和度在 74%~92%,表明该地区粉质黏土湿度比较大。液性指数在 0.15%~0.46%,表明该地区粉质黏土为大部分呈可塑和硬塑状态。压缩系数在 0.18 MPa⁻¹~0.30 MPa⁻¹,表明该地区粉质黏土属于中等压缩性土且有较高的粘聚力等。

钻孔取样鉴别可得,该地区粉质黏土总体上呈黄褐色,含少量钙质结核或含零星铁锰质斑点,大部分呈现可塑状态,刀切面稍有光泽,无震摇反应,干强度中等,韧性中等,均匀分布等特点。

2.2 试验数据的整理

对现场标准贯入试验和室内土工试验数据整理分析,标贯击数按照上述公式进行杆长修正,分层统计出每一土层所对应的标准贯入锤击数标准值。同样,土的物理力学性质参数相应分层统计。在进行数据处理时,对于粉质黏土物理力学参数的异常数据可以采用 Grubbs 准则进行判别。通过对数据的整理,将所计算得到的粉质黏土标贯击数和相应粉质黏土的物理力学参数归集到表 6 中。

3 标准贯入击数与粉质黏土部分物理力学参数相关性分析

通过表 6 标贯修正击数与粉质黏土部分物理力学参数的数据进行回归分析,建立了该地区的经验公式。

3.1 压缩模量 Es 与标准贯入击数 N 相关性分析

土的压缩模量是土体一定侧限条件下的竖向附加压应力与竖向应变的比值(MPa),也是测定判断土的压缩特性和计算地基压缩变化量的重要指标之一。从表 6 数据分析可知,随着标贯击数的增加,土的压缩模量越大(压缩系数越小),两者具

表 3 豫中平原地区地基土层情况

土层代号	土层名称	地质时代	土层描述
XZ-1-1	杂填土	Q4	杂色,稍湿,松散,主要由建筑垃圾组,土质不均匀。
XZ-1-2	粉土	Q4	黄褐色,稍密,稍湿,含零星铁锰质斑点,震摇反应迅速,干强度低,韧性低,该层均匀分布。
XZ-4-3	粉土	Q4	黄褐色,稍湿,稍密,含少量铁锰质斑,震摇反映中等,干强度低,韧性低,该层均匀分布。
XZ-7-2	粉土	Q4	黄褐色,湿,稍密,含少量钙质结核,震摇反应中等,干强度低,韧性低。
XZ-1-3	粉质黏土	Q4	黄褐色,可塑,含少量铁锰质斑及锈黄斑,无震摇反应,刀切面稍光泽,干强度中等,韧性中等,该层均匀分布。
XZ-1-7	粉质黏土	Q4	黄褐色,可塑,含少量钙质结核,粒径 1~2cm,无震摇反应,刀切面稍光泽,干强度中等,韧性中等,该层均匀分布。
XZ-9-3	粉质黏土	Q4	灰褐色,硬塑,含少量钙质结核,刀切面稍有光泽,无震摇反应,干强度中等,韧性中等,该层均匀分布。
XZ-13-3	粉质黏土	Q4	灰褐色,软塑,含零星铁锰质斑,夹零星贝壳碎屑,刀切面稍有光泽,无震摇反应,干强度中等,韧性中等,该层均匀分布。

表 4 豫中平原地区粉质黏土的物理力学性质

含水率 ω (%)	密度 ρ(g/cm ³)	饱和度 S _r (%)	液限 W _L (%)	塑限 W _p (%)	液性指数 I _L (%)	干密度 ρ _d (g/cm ³)	孔隙比 e
17.9~28	1.79~2.04	74~92	31.1~36	19.6~21.5	0.15~0.46	1.44~1.70	0.598~0.882

表 5 豫中平原地区市粉质黏土的物理力学性质

塑性指数 I _p (%)	压缩系数 α (MPa ⁻¹)	压缩模量 Es 0.1~0.2 (MPa)	粘聚力 c (Mpa)	内摩擦角 φ (°)	液限 W _L (%)	塑限 W _p (%)
11.5~14.4	0.18~0.30	3.59~9.83	24.6~33	14.1~19.6	31.1~36	19.1~21.5

表 6 贯入实击数与粉质黏土物理力学参数

标贯实击数 N·(击数)	标贯修正击数 N(击数)	压缩系数 α (MPa^{-1})	压缩模量 E_s (MPa)	粘聚力 c (Mpa)	内摩擦角 ϕ ($^\circ$)	孔隙比 e_0	液性指数 I_L (%)	塑性指数 I_p (%)
14	11.8	0.20	8.7	31.3	18.4	0.795	0.13	13.6
10	8.0	0.22	7.68	29.4	15.8	0.816	0.19	13.0
9	7.6	0.25	7.12	28.6	16.3	0.821	0.19	12.7
7	6.2	0.27	6.42	26.7	15.8	0.830	0.23	12.3
5	4.4	0.41	5.59	24.6	14.1	0.851	0.25	11.5
11	9.7	0.22	8.41	30.1	17.2	0.779	0.10	13.4
12	10.7	0.20	8.32	30.2	17.6	0.881	0.15	13.5
8	6.9	0.30	6.24	27.8	14.4	0.824	0.22	12.5
6	5.1	0.23	6.51	28.2	14.7	0.850	0.25	12.4

有良好的线性关系,见图 1。

拟合的线性表达式为:

$$E_s=0.4509N+3.6299$$

拟合优度 $R^2=0.9244$, 相关系数 $R=0.9615$ 以及对方程整体显著性 F 检验通过,表明压缩模量与标贯击数具有良好的正向线性相关。

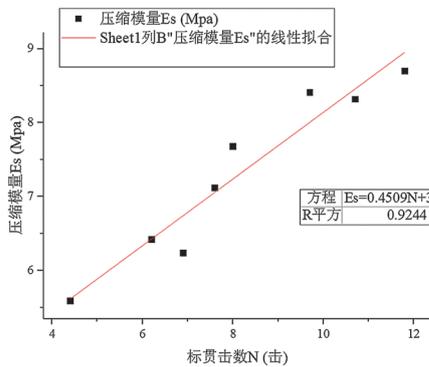


图 1 N- E_s 关系曲线图

3.2 粘聚力 c 和内摩擦角 ϕ 与标准贯入击数 N 相关性分析

土的粘聚力和内摩擦角是土的抗剪强度的两个重要指标。从表 5 数据分析可知,随着标贯击数的增加,土的粘聚力和内摩擦角越大,两者都与标贯击数有着正向线性关系,见图 2 和图 3。

拟合的线性表达式为:

$$c=0.7734N+22.8079$$

拟合优度 $R^2=0.8171$, 相关系数 $R=0.9039$ 以及对方程整体显著性 F 检验通过,表明粘聚力与标贯击数具有良好的正向线性相关。

拟合的线性表达式为:

$$\Phi=0.5732N+11.5217$$

拟合优度 $R^2=0.8739$, 相关系数 $R=0.9348$ 以

及对方程整体显著性 F 检验通过,表明内摩擦角与标贯击数具有良好的正向线性相关。

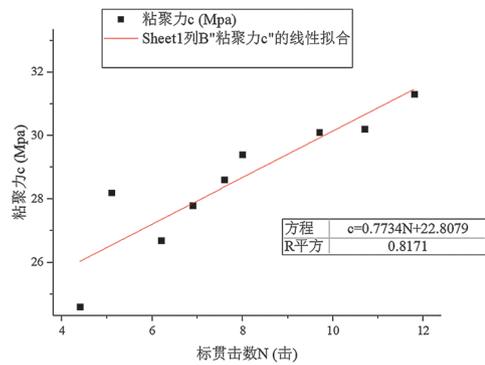


图 2 N- c 关系曲线图

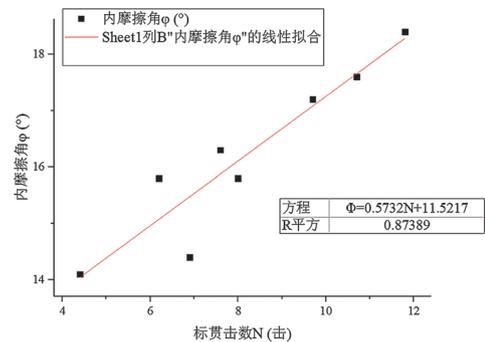


图 3 N- ϕ 关系曲线图

3.3 孔隙比 e 与标准贯入击数 N 相关性分析

土的孔隙比是土中孔隙体积与土粒体积之比,它是一个重要的物理性指标,可以用来评价天然土层的密实程度。一般孔隙比小于 0.6 是密实的低压缩性土,孔隙比大于 1 的土是疏松的高压缩性土。从表 6 数据分析得知,标贯击数与土的孔隙比存在一定反比关系,见图 4。

拟合的线性表达式为:

$$e = -0.00743N + 0.87826$$

拟合优度 $R^2=0.7793$, 相关系数 $R=-0.8828$ 以及对方程整体显著性 F 检验通过, 表明孔隙比与标贯击数具有良好的负向线性相关。

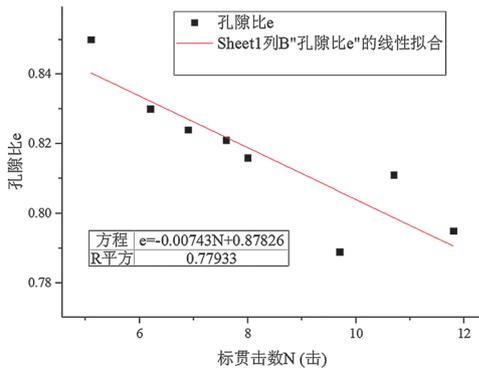


图 4 N-e 关系曲线图

3.4 土的塑性指数 I_p 与标准贯入击数 N 相关性分析

土的塑性指数是液限与塑限的差值, 即土处在可塑状态的含水量变化范围值。塑性指数越大, 土处于可塑状态的含水量范围越大。一定程度上塑性指数综合反应了黏性土及其三相组成的基本特性, 工程中常按照塑性指数对黏性土进行分类。从试验数据分析可知, 塑性指标与标贯击数有着良好的正向性线关系, 见图 5。

拟合的线性表达式为:

$$I_p = 0.2585N + 10.7446$$

拟合优度 $R^2=0.9038$, 相关系数 $R=0.9568$ 以及对方程整体显著性 F 检验通过, 表明塑性指数与标贯击数具有良好的正向线性相关。

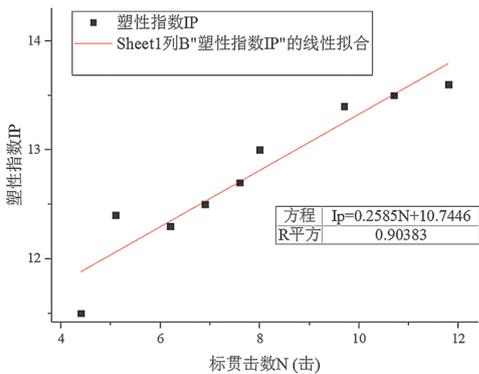


图 5 N- I_p 关系曲线图

3.5 土的液性指数 I_L 与标准贯入击数 N 相关性分析

土的液性指数是指黏性土的天然含水量和塑限的差值与塑性指数之比。当土的天然含水量小于塑限时, 液性指数小于零, 天然土处于坚硬状态。当土的天然含水量大于塑限时, 液性指数大于 1, 天然土处于流动状态。当天然含水量在液限和塑限之间时, 液性指数在 0 到 1 之间, 则天然土处于可塑状态。因此, 可以利用液性指数作为黏性土状态的划分指标。通过表 5 数据分析可得, 液性指数与标贯击数存在着明显负向线性关系, 随着标准贯入击数的增加, 液性指数越小, 见图 6。

拟合的线性表达式为:

$$I_L = -0.01956N + 0.34298$$

拟合优度 $R^2=0.8367$, 相关系数 $R=0.9147$ 以及对方程整体显著性 F 检验通过, 表明液性指数与标贯击数具有良好的负向线性相关。

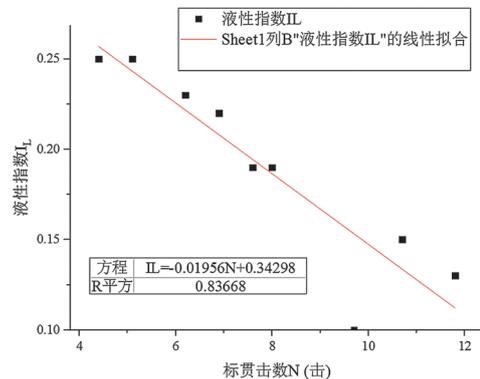


图 6 N- I_L 关系曲线图

4 预测值与实测值进行对比分析

分别选取该地区粉质黏土层二组数据, 利用所拟合的一元线性回归方程进行预测, 之后与实测试验数据对比及误差分析, 结果见表 6。

通过预测值与实验值对比结果可知, 利用线性回归方程推算该地区粉质黏土部分物理力学参数可获得较高的精确度, 预测值与实测值较为接近。误差在 10% 以内, 预测结果可信。经实践表明: 当工程地质条件与该地区差异较大时, 利用上述表 6 线性方程进行预测, 实测值与预测值有较大的误差 (误差可达到 200%, 甚至更高), 说明线性回归方程适用性受到地质条件影响。

表 6 预测值与实测值对比结果

土层	修正击数	线性方程	预测值	实测值	误差 (%)
粉质黏土	11.8	$E_s=0.450\ 9N+3.629\ 9$	8.950 52	8.7	-2.9
粉质黏土	5.3	$E_s=0.450\ 9N+3.629\ 9$	6.019 67	6.5	7.3
粉质黏土	8	$c=0.773\ 4N+22.807\ 9$	28.995 1	29.4	1.3
粉质黏土	7.3	$c=0.773\ 4N+22.807\ 9$	28.453 7	27.3	-4.2
粉质黏土	6.2	$\Phi=0.573\ 2N+11.521\ 7$	15.075 5	15.8	4.6
粉质黏土	7.6	$\Phi=0.573\ 2N+11.521\ 7$	15.878 0	16.3	2.6
粉质黏土	10.7	$e=-0.0074\ 3N+0.8782\ 6$	0.798 7	0.881	9.3
粉质黏土	11.8	$e=-0.0074\ 3N+0.8782\ 6$	0.826 9	0.869	4.8
粉质黏土	9.7	$I_L=-0.019\ 56N+0.342\ 98$	0.153 2	0.10	5.3
粉质黏土	4.6	$I_L=-0.019\ 56N+0.342\ 98$	0.2530	0.23	10
粉质黏土	4.4	$I_P=0.258\ 5N+10.744\ 6$	11.882 0	11.5	-3.3
粉质黏土	6	$I_P=0.258\ 5N+10.744\ 6$	12.295 7	12.6	2.4

5 结论

通过对豫中平原地区粉质黏土物理力学指标与标贯击数之间的分析得出以下结论:

(1) 通过室外标准贯入试验和室内土工试验对豫中平原地区粉质黏土的部分物理力学指标进行分析,运用一元线性回归方程建立了该地区粉质黏土部分物理力学指标与标贯击数之间的表达式,线性显著。

(2) 该地区粉质黏土的压缩模量 E_s 、孔隙比 e 和液性指数 I_L 、粘聚力 c 、内摩擦角 ϕ 以及塑性指标 I_P 都可以用标贯击数进行定量的预测,为该地区岩土工程勘察活动与工程建设提供价值参考。

(3) 通过预测值与实验值对比结果可知,利用该地区线性回归方程推算粉质黏土部分物理力学参数可获得较高的精确度,预测值与实测值较为接近。误差在 10% 以内,能够满足工程的需要。

参考文献:

[1] 编写委员会. 工程地质手册(第五版)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.

[2] 中华人民共和国建设部. 岩土工程勘察规范: GB 50021—2001[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004.

[3] 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.

[4] 王钟琦. 我国的静力触探及动静触探的发展前景[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(5): 517—522.

[5] 李小和. 武广客运专线红黏土地基压缩模量确定方法研究[J]. 铁道工程学报, 2008, 25(12): 37—40, 44.

[6] 刘辉. 地基土标准贯入锤击数与物理力学参数关系探讨[J]. 路基工程, 2011(5): 62—65.

[7] 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.

[8] 蒋建平, 李晓昭, 罗国煜. 南京地铁地基土标贯与物理及力学参数关系试验研究[J]. 铁道学报, 2010, 32(1): 123—127.

[9] 李慧爽. 盘锦辽滨地区第四纪地层物理力学性质的相关性分析及机制研究[D]. 长春: 吉林大学, 2020.

[10] 蒋进. 宜阳地区地基土标贯击数与主要力学参数的相关性分析[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2018.

[11] 简文彬, 吴振祥, 刘慧明, 等. 闽东南沿海地区软土静力触探参数相关分析[J]. 岩土力学, 2005, 26(5): 733—738.

[12] 陈远洪. 石武高铁黄淮平原区粉质土特性试验研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2015, 39(1): 225—228.

[13] Clayton C. The standard penetration test (SPT): methods and use. Construction Industry Research and Information Association, 1995.

[14] 徐光大, 徐光黎, 李俊杰. 日本标准贯入试验方法及其 N 值在岩土工程中的应用[J]. 安全与环境工程, 2011, 18(4): 33—38.