

DOI: 10.3785/j.issn.2096-7195.2023.02.001

【原位测试专栏】（专栏主持人：刘松玉）

基于电阻率静力触探的膨胀土膨胀性原位评价应用研究

储亚^{1*}, 刘松玉², 蔡国军^{2,3}, 韩爱民¹

(1. 南京工业大学 交通运输工程学院, 江苏 南京 211816; 2. 东南大学 岩土工程研究所, 江苏 南京 210096;
3. 安徽建筑大学, 安徽 合肥 230009)

摘要: 现行的膨胀土膨胀性能评价手段费时、复杂且难以反映膨胀土场地地基的真实状况, 亟需发展先进的原位测试方法和技术, 实现现场快速、准确的膨胀土膨胀特性评价。结合前期研究, 本文以电阻率静力触探 (RCPT) 作为原位评价技术, 采用商用高岭土和膨润土按质量比拌合配置人工膨胀土进行定量分析, 并以两种天然膨胀土进行验证。开展室内四电极法电阻率测试, 探明膨胀土自由膨胀率随电阻率的变化规律, 通过电阻率影响因素之含水量变化指数 b 作为中间参数, 构建了基于电阻率指标的膨胀土膨胀性能评价模型。采用自主研发的电阻率 CPT 标定罐贯入系统, 研究了原位实测电阻率参数评价膨胀土膨胀性能的适用性, 并验证了室内四电极法和原位电阻率 CPT 测得的电阻率之间呈 1:1 的线性关系, 电阻率 CPT 可以作为原位膨胀土膨胀性能评价技术。研究表明, 膨胀土的电阻率参数随自由膨胀率的增加而增加; 膨胀土电阻率与自由膨胀率之间呈指数定量关系; 电阻率指标可以作为原位膨胀土膨胀性能表征指标。

关键词: 电阻率静力触探; 电阻率; 膨胀性; 标定罐; 人工膨胀土

中图分类号: TU443

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2023)02-0091-06

Application of in-situ evaluation of expansive soil's expansibility based on resistivity static cone penetration test

CHU Ya^{1*}, LIU Song-yu², CAI Guo-jun^{2,3}, HAN Ai-min¹

(1. College of Transportation Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 211816, Jiangsu, China;
2. Institute of Geotechnical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu, China;
3. Anhui Jianzhu University, Hefei 230009, Anhui, China)

Abstract: The current evaluation methods of expansive soil's expansion performance are time-consuming, complicated, and difficult to reflect the real situation of expansive soil foundation. It is urgent to develop advanced in-situ testing methods and technologies for the rapid and accurate evaluation of expansion characteristics of expansive soil on site. Combined with the previous research, this paper takes the resistivity cone penetration test (RCPT) as the in-situ evaluation technology. Commercial kaolin and bentonite were mixed at different mass ratios to form artificial expansive soil for quantitative analysis, and two kinds of natural expansive soil were used for verification. The four-electrode resistivity test was carried out to investigate the variation of the free expansion rate of expansive soil with the resistivity. The expansion performance evaluation model based on resistivity was constructed by taking the moisture content index b as the intermediate parameter. Using the self-developed RCPT calibration chamber system, the applicability of the in-situ measured resistivity values to evaluate the expansion performance of expansive soil was studied. It is verified that there is a 1:1 linear relationship between the resistivity measured by four-electrode method and the resistivity measured by RCPT. RCPT can be used as an in-situ evaluation technology for expansive soil's expansion performance. The results show that the resistivity parameters of expansive soil increase with the increase of free expansion rate. There is an exponential relationship between the

收稿日期: 2022-03-29

基金项目: 江苏省自然科学基金项目青年项目 (BK20220355); 江苏省高等学校自然科学研究面上项目 (21KJB170019); 江苏省 2021 年“双创博士”项目 (JSSCBS20210385)。

作者简介: 储亚 (1987—), 男, 江苏淮安人, 江苏省双创博士, 讲师, 主要从事原位测试及环境工程相关工作。E-mail: chuya@njtech.edu.cn。

resistivity and free expansion rate of expansive soil. The resistivity index can be used as an index to characterize the expansive performance of in-situ expansive soil.

Key words: RCPT; resistivity; free expansion; calibration chamber; artificial expansive soil

0 引言

由于膨胀土自身的胀缩特性极易引发周边环境灾变,导致膨胀土地区的重要建(构)筑物(如桥梁、公路和铁路等)实体结构的变形破坏,且这些变形破坏常常具有长期潜伏性以及往复性^[1-2]。因此,膨胀土场地变形特性(即膨胀或收缩能力)的评价是国内外研究人员关注的重点与难点。目前,膨胀土膨胀性主要采用室内膨胀性测试实验结合膨胀土矿物成分及物理力学工程特性进行综合评价^[3-4]。由于土样扰动与应力释放以及土体矿物学和化学性质受环境影响显著,试验结果难以反映膨胀土地基的真实状况,膨胀土场地的膨胀特性经验模型的适用性及准确性较差^[5]。亟需发展先进的原位测试方法和技术,实现现场快速、准确的膨胀土膨胀特性评价。

电学测试具有无损、高效的测试特点,且电学测试参数可有效表征土体内部的水分状况、结构特征以及孔隙液污染浓度。同时研究表明,电阻率指标对于土体矿物学性质(如黏性土含量、比表面积以及水分含量)变化的敏感度显著^[6-8],而土体矿物学性质是膨胀土膨胀性能的主要影响因素。因此电学测试方法被广泛应用于膨胀土等特殊土地特性评价测试中^[9-12]。然而,当前在量化膨胀土膨胀特性研究方面,由于试验设备受限及数据解译方法的不足,相关研究成果仍局限在小尺度室内电学测试试验上。膨胀土场地膨胀性能原位电学测试评价方法尚不成熟,因此,需要进行电阻率原位测试标定实验,以验证基于室内四电极电阻率测试得出的膨胀土膨胀性电阻率评价方法的原位适用性。

本文通过自主研发的室内静力触探标定罐进行电阻率静力触探(RCPT)室内标定实验,结合室内膨胀土四电极电阻率测试实验,分析膨胀土膨胀性能电学表征的原位应用可行性。实验结果表明:电阻率参数可以作为膨胀土膨胀性能的代表指标;原位RCPT测试数据也可有效表征膨胀土的膨胀特性;室内四电极电阻率测试数据与原位RCPT测试数据有良好相关性,基于室内电阻率的膨胀土膨胀性评价模型可以应用于原位评价。

1 实验材料与方法

1.1 实验材料

本文通过将商用高岭土(主要成分为高岭石,采购于江苏苏州)与商用膨润土(主要成分为纳基蒙脱石,采购于江苏镇江)按膨润土质量百分比(BF)拌合配置成不同膨胀特性的人工配置膨胀土,配置膨润土质量百分比范围为0%~100%(间隔10%)。使用去离子水对天然黏性土进行多次冲洗,以去除土中多余的重金属离子。测试冲洗液电导率值,当冲洗液电导率小于600 μS/cm时,认为天然黏性土富含金属离子已被清洗完全。将纯净黏性土粉碎、过筛、放入105 °C烘箱中烘至恒重。根据设计含水量取定量去离子水拌入制备好的纯净黏性土粉末中,充分搅拌。搅匀后用自封袋密封,并保存于标准恒温养护室(室温25±0.5 °C,相对湿度>90%)以利于土样充分润湿。商用高岭土和膨润土的工程特性指标如表1所示。通过日立SEM S-3400N型号的电镜扫描仪进行人工配置膨胀土微观结构测试(图1),可以看出,随着膨润土质量百分比的提高,人工膨胀土表现出明显的聚集状态,与天然膨胀土孔隙结构类似。

同时,本文采用取自陕西汉中和非洲内罗毕(黑棉土)的两种天然膨胀土作为对比土样。两种天然膨胀土采用现场人工挖掘,通过自封袋密封后运送至实验室。两种天然膨胀土按土壤分类标准归类为高液限黏土(CH)^[13],其相关工程特性指标如表2所示。

表1 土样工程参数
Table 1 Soil engineering parameters

参数	膨润土	高岭土
天然含水量/%	7.1	12.9
液限/%	281.2	65.8
塑限/%	39.4	34.5
黏粒含量/%	40.3	22.2
土粒相对密度	2.7	2.7

表2 天然土样工程参数
Table 2 Natural soil engineering parameters

土样	含水量 w/%	重度 γ/ (kN/m ³)	液限 ω _L /%	塑限 ω _P /%	自由膨 胀率/%
汉中膨胀土	28.41	2.34	119.80	46.18	118.5
内罗毕黑棉土	—	—	187.18	37.77	225.0

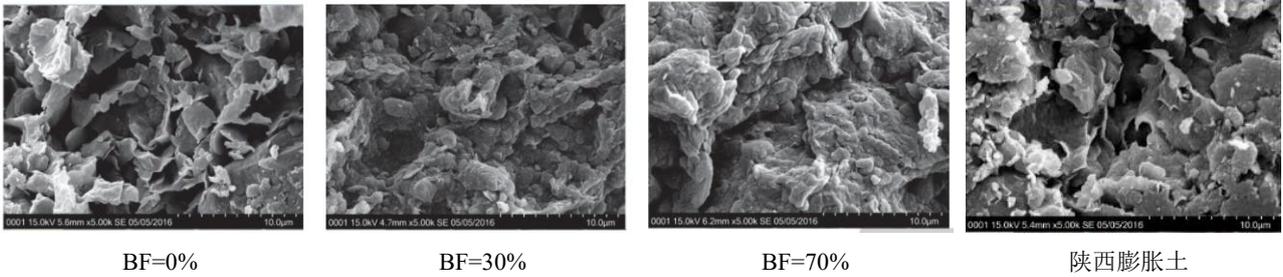


图 1 土样电镜扫描图

Fig. 1 Micrographs of mixed soils

1.2 室内四电极电阻率测试

室内四电极电阻率实验采用自主研发的四电极探针式米勒土盒进行测试(图 2),土盒采用有机玻璃材料(电阻率值超过 $10^{16} \Omega \cdot \text{cm}$),探针为铜针以增强导电性能。由于在低频状态下(频率小于 1000 Hz)材料导电特性基本稳定,故本文的电压采用 16 V 50 Hz 交流电源(国内交流电通用频率)^[10]。测试过程符合美国 ASTM G57-06 的四电极测试标准^[14]。根据欧姆定律,最终的四电极电阻率 ρ 可由式(1)得出:

$$\rho = VA / (IL) \quad (1)$$

式中: V 为探针间电压值; A 为土样截面积; I 为土样内部电流值; L 为探针间距。

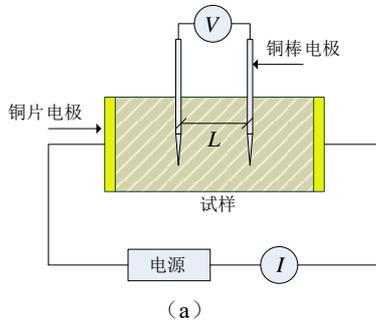


图 2 四电极电阻率测试设备

Fig. 2 Four electrode resistivity testing equipment

1.3 电阻率 CPT 标定罐实验

电阻率 CPT 标定罐实验采用东南大学岩土工程研究所采购自美国的原装电阻率 CPT 探头(图 3)进行测试,电阻率参数由 E4FCS 数据采集系统

收集。电阻率 CPT 探头为国际标准探头,电阻率测试系统由间距为 20 mm 的 4 个环形电极组成,电极间为绝缘树脂材料。贯入实验在自主研发的大直径恒定贯入速率标定罐(图 4)中进行,罐体高 1 500 mm,直径 750 mm(消除边界效应),通体由有机玻璃和绝缘树脂材料制成。

由于电阻率 CPT 探头电阻率测试部分位于探头尾部,将罐体下部填入 500 mm 厚松散砂土作为缓冲层,上部 1 000 mm 作为测试段。测试段分 3 层填入不同膨润土质量百分比的人工膨胀土,每层厚 330 mm,干密度 1.5 t/m^3 ,层间采用细砂分隔区分隔测试层。

单位: mm



图 3 电阻率 CPT 探头

Fig. 3 Cone of CPT with resistivity measurement

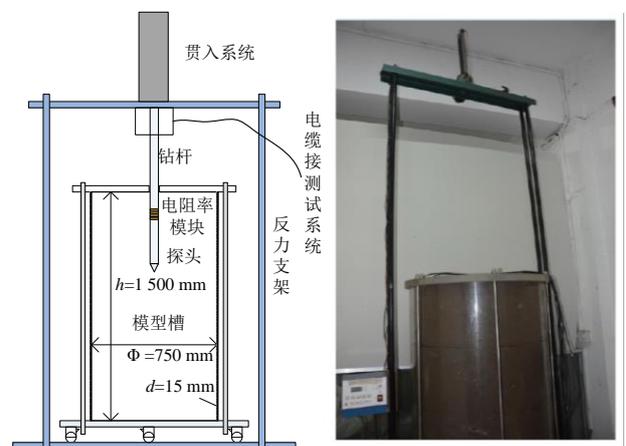


图 4 标定罐测试系统

Fig. 4 Calibration chamber system

2 结果与讨论

2.1 膨胀土膨胀特性分析

根据《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020)^[15]以及美国 ASTM D5890-11 规范^[4]开展人工配置膨胀土及天然膨胀土自由膨胀率测试实验(图5)。图中可以看出,两种规范得出的自由膨胀率随膨润土质量百分比的增加呈相似的指数增加,BF值超过40%后增加速率明显升高,BF值为0%时自由膨胀率和自由膨胀系数分别为27%和1.62 g/mL,符合非膨胀土,而当BF值达到100%时,自由膨胀率和自由膨胀系数分别增加至816%和12.86 g/mL,属于极强膨胀性土,两种天然膨胀土中的汉中膨胀土自由膨胀率在BF值40%~50%之间,而黑棉土在60%~70%之间。根据上述实验可以得出:人工配置膨润土BF值在0%~70%之间可以有效模拟天然膨润土膨胀特性。后续膨胀性电学评价将采用BF=0%~70%作为研究区间。

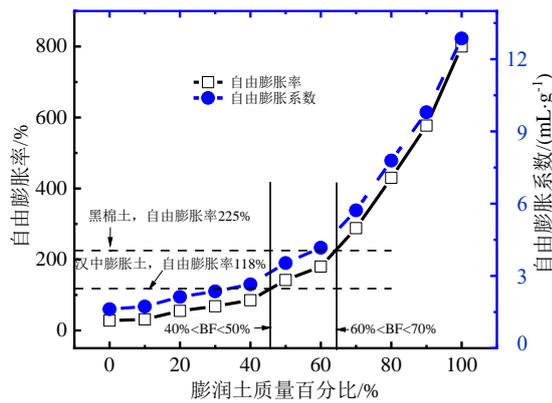


图5 人工配置膨润土自由膨胀率

Fig. 5 Free expansion potential of artificial expansive soil

2.2 室内四电极电阻率测试分析

根据课题组的前期研究^[16-19]可以得出,电阻率指标可以有效表征膨胀土的膨胀特性。但是含水量作为土体电阻率参数的重要影响因素,其变化带来的影响是不可忽略的。通过室内四电极电阻率测试分析人工膨胀土在不同含水量下的变化规律(图6),并通过天然膨胀土验证其规律的适用性,进而得出膨胀土膨胀性能的评价模型。

图6中可以看出,孔隙率在0.42~0.43范围内,人工膨胀土、天然膨胀土的自由膨胀率和电阻率参数的变化规律一致,随着土体自由膨胀率的增加,电阻率参数呈指数关系增加,当自由膨胀率超过150%时,增加速率逐渐降低。同时也可以看出含水量对电阻率的影响显著,随着含水量提高电阻率呈

上升趋势。膨胀土电阻率 ρ 与自由膨胀率 δ 之间的指数关系可以表示为:

$$\rho = a\delta^b \quad (2)$$

式中: a 和 b 为与含水量以及土体结构特性相关的拟合参数。不同含水量之间的具体参数如表3所示。

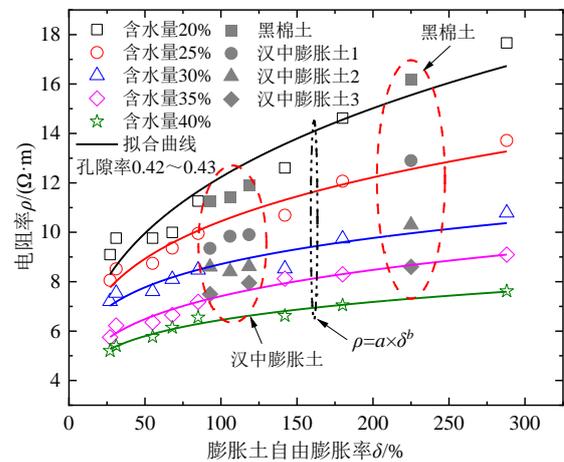


图6 膨胀土自由膨胀率与电阻率相关关系

Fig. 6 Relationship between free expansion potential and resistivity

表3 膨胀土电阻率与自由膨胀率关系

Table 3 Relationship between free expansion potential and resistivity

含水量/%	电阻率/(Ω·m)	相关性系数 R^2	a	b
20	$\rho = 3.13 \times \delta^{0.29}$	0.91	3.13	0.29
25	$\rho = 3.17 \times \delta^{0.23}$	0.94	3.17	0.23
30	$\rho = 3.08 \times \delta^{0.20}$	0.89	3.08	0.20
35	$\rho = 3.04 \times \delta^{0.18}$	0.97	3.04	0.18
40	$\rho = 3.16 \times \delta^{0.16}$	0.96	3.16	0.16

表3中可以看出,膨胀土电阻率与自由膨胀率之间的定量关系拟合度很高,相关性系数在0.89~0.97之间。拟合参数 a 在3.04~3.17之间变化,与含水量之间无明显相关性,分析 a 值为膨胀土结构参数。拟合参数 b 随含水量的增加从0.29降至0.16,具有明显相关性,本文将拟合参数 b 作为含水量变化指数。分析含水量与含水量变化指数 b 之间的相关关系(图7),可以看出含水量与含水量变化指数 b 之间呈线性变化关系,随着含水量 w 的增加,含水量变化指数 b 线性降低,两者间的相关关系为:

$$b = A - Bw = 0.4 - 0.62w \quad (3)$$

式中:拟合参数 A 和 B 为场地相关变量。

将式(3)代入式(2)可以得出膨胀土电阻率与自由膨胀率之间的定量关系:

$$\rho = a\delta^{A-Bw} \quad (4)$$

根据上述研究可得, 现场测得膨胀土场地电阻率以及含水量数值即可通过式 (4) 计算得出相应的膨胀土自由膨胀率。

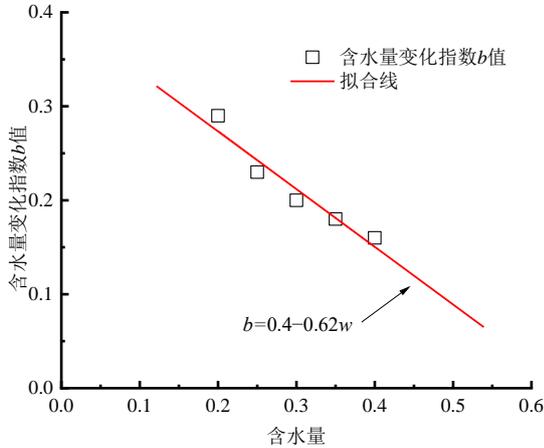


图 7 含水量变化指数 b 拟合关系

Fig. 7 Fitted relationship between the moisture content index b and water content

2.3 电阻率 CPT 测试参数分析

室内四电极电阻率测试得出的膨胀土膨胀性能评价公式在原位电阻率 CPT 上的适用性尚未可知。本文通过电阻率 CPT 标定罐实验进行验证, 以分析基于室内电阻率参数的膨胀性评价模型的适用性。电阻率 CPT 贯入测试结果如图 8 所示。

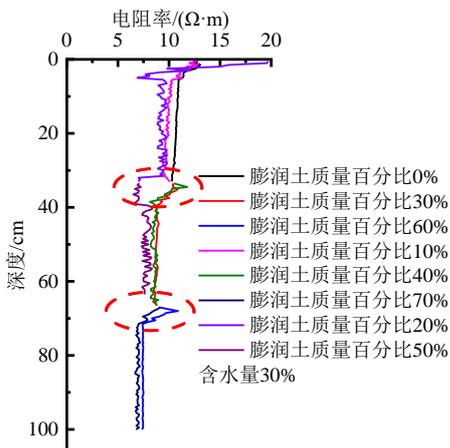


图 8 人工膨胀土电阻率随深度变化曲线
Fig. 8 Variation of resistivity with depth

图 8 中可以看出, 电阻率 CPT 测得的膨胀土电阻率参数与膨润土质量百分比 (即自由膨胀率) 之间的相关关系与室内四电极法测试的规律相类似。人工膨胀土的电阻率随着自由膨胀率的增加而降低, 且单一层 (自由膨胀率恒定) 中的电阻率值基本保持稳定。同时也可以注意到, 在特定土层中电阻率随深度有一定的降低趋势, 分析为土样中水分

的迁移使得土样下部含水量高于上部引起的导电能力变化。每层土之间 10~20 cm 范围内 (图中红色虚线区域) 电阻率值呈波动状态, 这是由于土层之间细砂分隔层的影响所致。

具体分析图 8 中的电阻率随膨胀土膨胀性变化规律可以看出, 相同膨胀性等级的土层中电阻率 CPT 测得的电阻率值与上述室内四电极法测得的电阻率值处于同一数量级, 处于 6~12 Ω·m 之间。需要建立原位电阻率 CPT 测试值与室内四电极法测试值之间的对应关系, 以得出膨胀土膨胀性能电阻率评价模型的原位应用公式。

2.4 电阻率 CPT 探头原位应用分析

结合上述电阻率 CPT 标定罐试验与室内四电极法测试试验选取的典型测点电阻率实测值对应关系, 得出本文所提出的基于电阻率指标的膨胀土膨胀性能评价模型的原位应用方法。

选取孔隙率在 0.42~0.43 范围内, 不同含水量下室内四电极法测得的电阻率值与电阻率 CPT 测得的电阻率值之间的对比关系, 如图 9 所示。

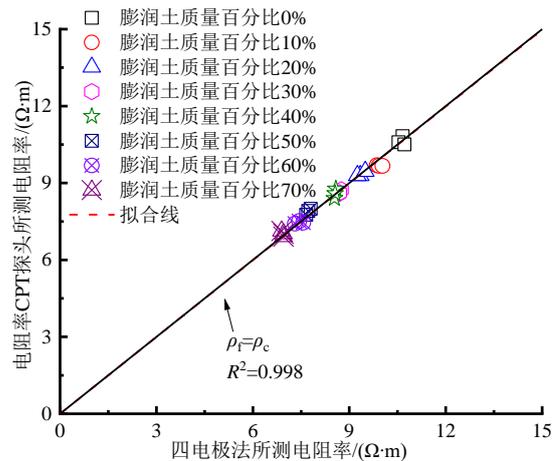


图 9 室内四电极法与电阻率 CPT 法电阻率对比
Fig. 9 Comparison of measured resistivity by the four electrode method and by the CPT method

图 9 中可以看出, 室内四电极法测得的电阻率值 ρ_r 与原位电阻率 CPT 法测得的电阻率值 ρ_c 在不同膨胀性能以及不同含水量状态下基本呈 1:1 线性关系, 拟合参数可达 0.998。实验结果可以得出两种测试方法的测试原理一致, 在相同状态参数下测得的电阻率值基本相同。

综合上述试验结果可以得出: (1) 室内四电极法与原位电阻率 CPT 法测得的土体电阻率数值一致; (2) 电阻率参数评价膨胀土膨胀性方法原位适用性较好; (3) 本文提出的基于电阻率指数的膨胀土膨胀性能评价模型可以直接应用于原位电阻率 CPT 测试。

3 结 论

本文通过试验研究和理论分析得出了电阻率指标可以有效表征膨胀土膨胀性参数,建立了基于室内电阻率参数的膨胀土自由膨胀率预测模型,并通过电阻率 CPT 标定罐实验验证了模型原位环境下的适用性。具体的结论与建议如下:

(1) 膨胀土的电阻率参数随自由膨胀率的增加呈指数关系增加,含水量变化指数 b 值与含水量之间呈线性关系。

(2) 膨胀土电阻率与自由膨胀率之间呈 $\rho = a\delta^{A-Bw}$ 的定量关系,电阻率指标可有效表征膨胀土膨胀性能。

(3) 电阻率 CPT 标定罐实验得出的电阻率与自由膨胀率变化规律和室内四电极法相一致,且两种方法的实测电阻率值呈 1:1 线性关系,本文提出的膨胀土膨胀性电阻率评价模型可以应用于原位电阻率 CPT 测试中。

组稿专家 刘松玉



东南大学首席教授、博士、博士生导师;全国创新争先奖获得者、国家级人才计划入选者;现任东南大学岩土工程学科首席科学家,东南大学城市地下空间研究中心主任,江苏省城市地下空间与环境安全重点实验室主任。长期致力于软弱地基原位测试与加固技术研究。

参考文献

- [1] PEDARLA A, CHITTOORI S, PUPPALA A J. Influence of mineralogy and plasticity index on the stabilization effectiveness of expansive clays[J]. Transportation Research Record, 2011, 2212(1): 91-99.
- [2] PUPPALA A J, PUNTHUTAECHEA K, VANAPALLI S K. Soil-water characteristic curves of stabilized expansive soils[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2006, 132(6): 736-751.
- [3] THOMAS P J, BAKER J C, ZELAZNY L W. An expansive soil index for predicting shrink-swell potential[J]. Soil Science Society of America Journal, 2000, 64(1): 268-274.
- [4] American Society for Testing and Materials. Standard Test Method for Swell Index of Clay Mineral Component of Geosynthetic Clay Liners: ASTM D5890-11[S]. 2006: 5890-5895.
- [5] LESMES D P, FRIEDMAN S P. Relationships between the electrical and hydrogeological properties of rocks and soils[M]//Hydrogeophysics. Dordrecht: Springer, 2005: 87-128.
- [6] CHU Y, LIU S, CAI G, et al. A study in the micro-characteristic and electricity properties of silt clay contaminated by heavy metal zinc[J]. Japanese Geotechnical Society Special Publication, 2016, 2(14): 556-559.
- [7] LI J, CAMERON D A, REN G. Case study and back analysis of a residential building damaged by expansive soils[J]. Computers and Geotechnics, 2014, 56: 89-99.
- [8] KIBRIA G, HOSSAIN S, ALAM Z. A statistical model based on experimental results: correlating electrical resistivity with geotechnical properties of clayey soils[R]. 2014: 14-1722.
- [9] ZHENG J L, ZHANG R, YANG H P. Validation of a swelling potential index for expansive soils[J]. Unsaturated Soils: Advances in Geoengineering, 2008: 397-402.
- [10] YOON G L, PARK J B. Sensitivity of leachate and fine contents on electrical resistivity variations of sandy soils[J]. Journal of Hazardous Materials, 2001, 84(2-3): 147-161.
- [11] 龚壁卫, 鞠佳伟, 叶艳雀. 用电导率测定自由膨胀率的方法研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(8): 1280-1283. GONG Bi-wei, JU Jia-wei, YE Yan-que. Correlative researches on free swelling ratio and electrical conductivity of expansive soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(8): 1280-1283.
- [12] 缪林昌, 严明良, 崔颖. 重塑膨胀土的电阻率特性测试研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(9): 1413-1417. MIAO Lin-chang, YAN Ming-liang, CUI Ying. Studies on electrical resistivity of remold expansive soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(9): 1413-1417.
- [13] ASTM International, USA. Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils: ASTM D4318-2010[S]. 2012.