

膨胀土的电导率与膨胀性的关系研究

龚壁卫^{1,2}, 周丹蕊³, 魏小胜⁴

(1. 长江科学院 土工所, 湖北 武汉 430010; 2. 水利部 岩土力学与工程重点实验室, 湖北 武汉 430010;
3. 科廷大学 理工学院, 澳大利亚 帕斯; 4. 华中科技大学 土木工程与力学学院, 湖北 武汉 430074)

摘 要: 膨胀土是一种高塑性、强亲水的黏性土。由于黏土矿物含量较高, 膨胀土颗粒的交换阳离子含量也较高, 总比表面积较大, 在电导率测试指标上反映是膨胀土的导电性随膨胀性的增大而增强。选取强、中、弱 3 种不同膨胀等级的代表性试样, 采用无电极电阻率测定仪和便携式电导率探头, 测试了膨胀土泥浆和孔隙水溶液电导率测试, 采用原子吸收光谱仪检测了膨胀土孔隙水溶液中的离子种类、含量等。研究表明, 膨胀土孔隙水溶液的导电性与膨胀土泥浆的导电性均随膨胀性增大而增大, 膨胀土的电导率和自由膨胀率具有良好的线性关系, 工程中可以利用这一原理进行膨胀土的快速判别。

关 键 词: 膨胀土; 电导率; 亲水性

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2016)增 2-0323-06

Study of relationship between electrical conductivity and swelling properties of expansive soil

GONG Bi-wei^{1,2}, ZHOU Dan-rui³, WEI Xiao-sheng⁴

(1. Department of Geotechnical Engineering, Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan, Hubei 430010, China;

2. Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Engineering of the Ministry of Water Resources, Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan, Hubei 430010, China; 3. Curtin University Australia, Faculty of Science & Engineering, Perth, Australia; 4. School of Civil Engineering Mechanics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430070, China)

Abstract: Expansive soils always have high plasticity and strong hydrophilicity. Because of high clay mineral contents, high cation exchange capacity, and relatively larger specific surface area, the electrical conductivity of expansive soils increase with swelling capacity. Strong, middle and weak expansive soils are selected to study the relationships between conductivity and swelling capacity. By using non-contacting electrical resistivity device and portable conductivity probe, the electrical conductivity of both the soil slurry and the pore water are tested. And atomic absorption spectrometer is used to detect ion species and contents of pore water. Researches show that the conductivity of slurry and pore water both increased with swelling capacity, and the increasing trend show a good linear relationship. Thus, conductivity can be a good method for rapid identification of expansive soils.

Keywords: expansive soil; electrical conductivity; hydrophilicity

1 引 言

土的导电性包含土颗粒表面导电和孔隙水导电两部分, 其中孔隙水溶液的导电性取决于孔隙水的离子含量和浓度, 土颗粒表面导电则取决于黏土矿物的电学活性, 即颗粒表面吸附特征与颗粒之间的连结特性。黏土颗粒表面存在双电层, 双电层中的阳离子和阴离子在电场的作用下具有导电能

力, 土颗粒表面导电性随黏粒含量增加而增大, 并与土的可交换阳离子含量、比表面积相关^[1-2]。膨胀土是一种高塑性、强亲水的黏性土, 由于其黏土矿物含量较高, 土颗粒的可交换阳离子含量也较高, 总比表面积较大, 致使土颗粒具有明显的吸水膨胀的趋势。土壤的导电性和膨胀性均与土壤的化学活性密切相关, 在导电性与膨胀性之间势必存在某种联系。由于膨胀土的判别对岩土工程勘察、设计、施

收稿日期: 2016-07-06

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 51279015); 国家“十二五”科技支撑计划课题 (No. 2015BAB07B04)

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (51279015) and the National Key Technology Research and Development Program of China during the 12th "Five Year Plan" (2015BAB07B04).

第一作者简介: 龚壁卫, 男, 1962 年生, 硕士, 教授级高级工程师, 主要从事土的工程性质研究、非饱和土、膨胀土试验研究。E-mail: BWGong@vip.sina.com

工和现场应急处理等至关重要,尤其在某些需要快速判别岩土膨胀性的场合,现有判别指标或试验条件相对复杂,或测试时间相对较长等均难以实现快速、准确地判别。探讨膨胀性与电导率的相关性,可为膨胀土的快速判别提供新的途径。龚壁卫等^[3]探讨了膨胀土的电导率与液限含水率、阳离子交换量的关系,并初步构建了膨胀土的电导率与自由膨胀率的关系,但尚缺乏对膨胀土离子成分、含量与导电性能更深入的分析,本次开展了相关的试验研究。

2 膨胀土泥浆的导电性测试

为使试验成果具有一定的代表性,选用河南南阳和河北邯郸的弱、中、强 3 种典型代表性膨胀土试样,试样编号为 LM、ME、HE,依据土工试验规程^[4]试验方法,对试样的界限含水率、自由膨胀率指等基本指标进行了测试,结果见表 1。3 种试样的自由膨胀率分别为 52%、74%、159%。界限含水率试验显示,随着膨胀性的增强,试样的液、塑限含水率和塑性指数均随之增大,符合膨胀土的一般规律。

表 1 3 种典型膨胀土基本物理特性

Table 1 Basic physical properties of three expansive soils

取样地区	试样编号	自由膨胀率/%	液限 ω_l /%	塑限 ω_p /%	塑性指数 I_p /%
河南南阳	LE	52	51.8	19.0	32.8
河南南阳	ME	74	58.0	21.2	36.8
河北邯郸	HE	159	92.0	28.0	64.0

2.1 测试仪器及测试过程

采用无电极电阻率仪^[4-5]进行膨胀土泥浆的电导率测试如图 1 所示。其基本原理:由信号发生器和放大器在变压器的初级线圈上输入一定的交变电压,在环形样品构成的次级线圈上产生一个恒定的环电压 U ,安装在电脑中的数据采集系统自动记录电流传感器测得的通过样品的环电流 I 。由环电压、环电流以及样品的几何尺寸可得到样品的电阻率。测试时环境温度为 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$,采集测试数据时间间隔为 1 min。无电极电阻率测定仪没有使用电极,消除了传统电极法测量样品电阻率时电极与样品接触不良所导致测量精度的问题,可以有效地提高测量精度。

采用原子吸收光谱测试膨胀土孔隙水溶液 K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{3+} 离子, Al^{3+} 用等离子体-质谱测试, SiO_4^{4-} 用硅钼蓝比色光度测试,土壤提取液的

电导率和 pH 分别用雷磁电导率仪和 pH 仪测试。测定样品电阻率前,打开电脑上电阻率的测试软件,设置参数,然后制备膨胀土泥浆样品。

孙宇瑞^[7]研究了土壤电导率测定时试样含水率对测试成果的影响,认为当土壤的含水率为 15%~30% 时含水率对电导率的影响最为显著,当含水率超过 30% 后土壤电导率的变化趋势明显减缓,并趋于稳定。考虑到膨胀土液限含水率较高的特点,配制 3 种典型膨胀土试样含水率均为 70%,以保证试样泥浆的均匀性,试样编号为 LM-07、ME-0.7、HE-0.7。

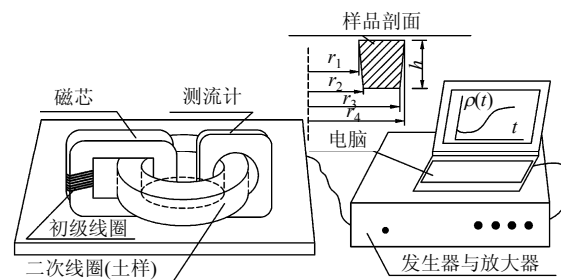


图 1 无电极电阻率测定仪

Fig.1 Non-contact electrical conductivity measurement appliance

泥浆制备采用胶砂搅拌机拌和 4 min,搅拌均匀后立即把试样泥浆倒入电阻率测定仪的环形模具中,轻微振荡以排除气泡,再加盖密封以防水分蒸发,启动电脑上的数据记录软件开始测试。从加水到开始记录数据的时间控制在 5~10 min 内,数据记录的时间间隔为 1 min,直到 24 h 时停止记录。试验结束后,拆模并测量样品的高度,并对测得的电阻率进行校核,得到样品的实际电阻率,取电阻率的倒数即为土壤的电导率(电导率的单位用欧姆每米 s/m 表示)。

膨胀土泥浆试样电导率测试完成后,采用真空抽液和离心分离方法从泥浆样品中提取液相,再测试液相的电导率、pH 值、以及其中各离子的浓度,以分析膨胀土中的带电离子成分及含量,并对比土壤泥浆与液相提取液的导电性差异。

2.2 膨胀土泥浆导电性随时间的变化规律

图 2 为 3 组膨胀土泥浆试样的电导率随时间的变化曲线。从图中可以看出,3 组样品的电导率在 0~200 min 内有一个明显的上升阶段,表明膨胀土中离子的溶解有一定的时间过程。之后至 1 440 min 电导率发展过程平稳并趋于稳定,意味着试样中可溶离子已经完全溶解于拌合物的液相中。最终 3 组膨胀土泥浆试样 24 h 稳定后的电导率分别为 0.083、

0.102、0.223 S/m。可以看出高膨胀性土 HE 配制的泥浆 HE-0.7 的电导率最大，其电导率分别是中、弱膨胀土的 2.2 倍和 2.7 倍，中膨胀土泥浆电导率是弱膨胀土的 1.2 倍。膨胀性强弱与导电性大小明显相关。

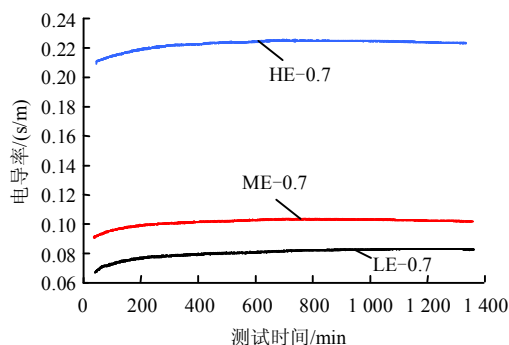


图 2 3 种膨胀土泥浆的电导率变化曲线

Fig.2 Change curves of conductivities of three expansive soils

理论上讲，膨胀土泥浆浆体的电导率存在一个最大值。为了推算电导率的最大值，本文建立了电导率与时间的关系曲线。通过对试验开始至 24 h 的测试数据进行拟合，可得拟合公式见表 2。

表 2 泥浆电导率的拟合曲线

Table 2 Fitting curve of electrical conductivity of mud

试样编号	σ - t 双曲线拟合方程	相关系数 R^2	电导率最大值 /(mS/m)	半衰期 /min
LE-0.7	$\sigma = \frac{0.0841t}{t+20.39}$	0.999 9	0.084 1	20.39
ME-0.7	$\sigma = \frac{0.104t}{t+10.03}$	1.000 0	0.104 0	10.03
HE-0.7	$\sigma = \frac{0.226t}{t+5.947}$	1.000 0	0.226 0	5.947

以上各式的相关性可以看出，泥浆浆体的电导率随时间的关系符合双曲线型式，当 $t \rightarrow \infty$ 时， σ 分别为 0.0841、0.104、0.226 S/m，结合试样的自由膨胀率指标可知，试样的膨胀性越高，泥浆浆体的电导率也越大。

根据上述拟合曲线分析可见，3 组试验曲线的半衰期分别为 20.39、10.03、5.947 min，说明泥浆浆体电导率测试的稳定时间随着膨胀性的增大而减小。

通过本项试验可得到一个重要的结论：在固定的水土比和一定的时间内，膨胀土泥浆试样的导电性与膨胀性成正比，因此，可以根据膨胀土泥浆的电导率进行膨胀潜势的判别。

3 泥浆提取液离子浓度测试

为进一步分析膨胀土泥浆的导电性能与孔隙

水溶液中离子成分的关联，分别提取上述 3 组膨胀土试样 24 h 后的泥浆液相（试样编号分别为 S-L、S-M 和 S-H），采用原子吸收光谱仪等设备对泥浆提取液的离子成份、浓度以及电导率进行检测，测试成果如图 3 和表 3 所示。

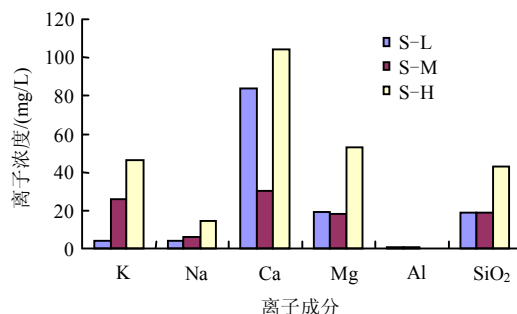


图 3 膨胀土泥浆提取液的离子浓度

Fig.3 Ionic concentration of the mud of expansive soils extract

表 3 为 3 组膨胀土泥浆提取液中主要离子和相应的浓度及电导率测试结果。由表可见，3 组试样中离子成分主要为 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Al^{3+} 、 SiO_2^{4-} ，此外，测试结果还显示有较少的 Fe^{3+} 离子存在。

3 组试样中 K^+ 、 Na^+ 离子的浓度与膨胀性强弱的关系较为明显，试样的电导率也与膨胀性强弱正相关。分析认为，黏土矿物的导电性与其矿物晶体的“同晶代换”现象有关。所谓“同晶代换”，即是黏土矿物在形成过程中晶架内的四面体或八面体单元中心的阳离子被另一种大小相似的阳离子所替代的现象。同晶代换常以 Mg^{2+} 、 Fe^{3+} 或 Fe^{2+} 代换 Al^{3+} 。代换发生后，如果互换的阳离子同价，则晶架内保持电中性，否则将使晶体内正负电荷不平衡，并产生晶体带电现象。若以低价离子代换高价离子，即以 Mg^{2+} 、 Fe^{3+} 代换 Al^{3+} ，晶体将带一个负电荷，反之，则代正电荷。黏土矿物的同晶代换现象多以低价代高价为主，故晶体表面以带负电荷为主^[8]。从表 3 的试验成果来看，弱、中膨胀土与强膨胀土 Mg^{2+}/Al^{3+} 的比值差别明显，表明强膨胀土中同晶代换强烈，产生了较多的负电荷，因此，测得的电导率明显偏高，正是膨胀土导电性与膨胀性关联的主要机制。

对比膨胀土泥浆试样的测试结果可知，3 组膨胀土试样的电导率与膨胀性均呈正相关关系，即膨胀性越大，导电性越好。两种试样试验规律是一致的，但在电导率的绝对值上，提取液的电导率普遍大于泥浆的测试结果，原因在于泥浆中所含杂质对测试结果产生一定的影响。

表3 3组膨胀土的离子的浓度及电导率
Table 2 Ionic concentration and electrical conductivity of expansive soils

液相 样品	K ⁺ /(mg/L)	Na ⁺ /(mg/L)	Ca ²⁺ /(mg/L)	Mg ²⁺ /(mg/L)	Al ³⁺ /(mg/L)	SiO ₄ ⁴⁻ /(mg/L)	Fe ³⁺ /(mg/L)	Mg ²⁺ /Al ³⁺ /(mg/L)	电导率 σ /(s/m)
S-L	4.02	4.03	83.66	19.08	0.61	18.90	≤0.01	31.28	0.133
S-M	25.85	6.07	30.24	18.01	0.88	18.79	≤0.01	20.47	0.173
S-H	46.59	14.67	104.28	53.18	0.18	43.04	≤0.01	295.44	0.414

4 密度与含水率对电导率测试结果的影响分析

运用无电极电阻率仪进行土壤导电性测试具有测试精度更高的特点,但对于一些需要进行膨胀性快速判别的场合,仍存在试验操作偏复杂、检测时间过长等问题,笔者引进国外先进的电导率探头,探索出一套测试土壤导电性的试验方法^[3]。

电导率探头采用频域反射原理(frequency domain reflectometry, FDR),利用电磁脉冲原理,根据电磁波在介质中传播频率测量土壤的表观介电常数。探头由探针及测试单元、读数仪组成,测试时由测试单元发射一定频率的电磁波,电磁波沿探针传输,到达底部后返回,检测探头输出的电压,即可测量出土壤的电导率。

采用电导率探头测量土体的电导率最大的难点是电极与样品接触不良的问题,通过分析笔者认为测量电极与样品接触不良的问题与样品的密度有关,若将样品调制成高含水率的液相土膏以后,问题应能迎刃而解,余下的问题就是样品含水率对测试结果的影响。前已述及,孙宇瑞^[7]的研究表明,当试样的含水率超过30%以后含水率对成果的影响明显减缓。

笔者等在室内开展了不同密度、含水率试样的土壤电导率测试,以进一步分析了试样密度、含水率对电导率测试结果的影响。

试验样品仍选用南阳中膨胀土(试样编号ME-0.7),试样干密度分别控制为1.1、1.2、1.3 g/cm³、1.4、1.5 g/cm³,试样含水率10%~110%。试样电导率测试采用英国原产的WET探头。具体试验方法:称取一定质量的风干或低温烘干代表性土样,根据干土质量,加纯净水(或去离子水)配制成不同含水率的试样,再采用击实压密的方法制作不同密度的重塑样。本次试验击实压密试样的最大含水率控制为40%,原因是当试样含水率超过40%后样品基本呈液态土膏状,已不可能进行试样的重塑,仅用玻璃棒即可将土水搅拌均匀待测。试样制备完成后,用土壤电导率探头插入试样进行土样的电导率测试,并在

测试完成后,烘干剩余土样,实测土样含水率。

图4为上述试验测试成果。分析试样电导率与含水率的关系可见,随着样品含水率的增大,测试样品的电导率也逐渐增大,不同密度试样的电导率差值也逐渐增大,并在含水率接近20%时电导率以及电导率差值均出现峰值,以后,随着含水率增大,不同密度试样的电导率测试值和电导率差值均减小,并逐渐趋于一致。

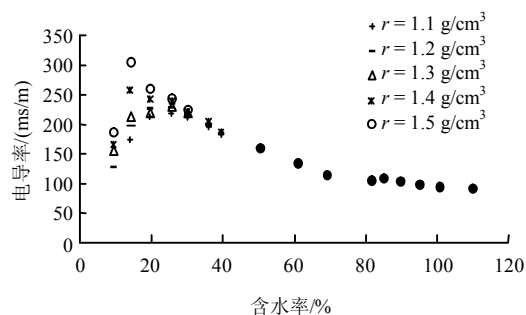


图4 不同含水率、密度条件下膨胀土试样的电导率
Fig.4 Electrical conductivities of expansive soils sample under different dry densities and water contents

对图4试验曲线进一步分析,首先,试样的最优含水率为20%~24%,最大干密度为1.57 g/cm³。其次,试样的液限含水率为58%。分析认为,当试样含水率低于最优含水率时,电导率随着含水率的增加而增大,并在最优含水率附近达到峰值,这一过程可以解释为试样的离子浓度随着含水率增大而增大,并且测量电极与样品的接触随干密度增大而更为紧密,因此,这一过程中试样的干密度对测试结果的影响也是最大;当试样的含水率超过最优含水率后,电导率则随含水率的增大而减小。仍然用离子的浓度来解释这一过程,即当含水率继续增大时,试样中的离子浓度随含水率增大而减小,此时由于含水率的增大,试样与测量电极的接触已不取决于试样密度;当试样的含水率超过其液限含水率58%以后测试电导率曲线下落的速率逐渐变小,并逐渐趋于平缓,说明试样含水率大于液限以后,含水率对测试结果已经没有太大的影响。测试结果还表明,试样的干密度对电导率测试结果的影响在低于最优含水率一侧影响更为显著,当试样含水率超

过最优含水率以后, 试样的干密度对测试结果影响逐渐减小, 当试样含水率达到 40% 时, 不同密度试样测得的电导率值近乎相等。

通过以上测试分析可知, 用电导率探头进行膨胀土的电导率测试可以通过规范试样的含水状态, 如制备超过土样液限含水率的石膏的方法消除含水率、密度对电导率测试结果的影响。

5 电导率与自由膨胀率的关系

目前岩土工程勘察规范^[9]、膨胀土地区建筑技术规范^[10]以及水利水电工程地质勘察规范^[11]、铁路工程特殊岩土勘察规程^[12]、公路路基设计规范^[13]等均采用自由膨胀率作为膨胀土判别的主要指标。由于自由膨胀率试验历时相对较长, 且测试结果一定程度上受人为因素的影响^[14-15], 尤其在某些需要对土的膨胀性进行快速判别的场合, 自由膨胀率指标更难以满足需要。电导率与土壤的电化学性质关系密切, 与土壤的膨胀性线性关联, 且电导率测试方法简单, 通过控制一定的试验条件, 即可获得相对准确的结果。为此, 本文广泛采集了全国膨胀土(岩)地区的近百组膨胀土(岩)试样, 分别进行电导率与自由膨胀率测试, 并分析两者的相关关系, 以此为后续构建膨胀土的现场快速判别方法奠定基础。

膨胀土试样分别取自广西、湖北、河南、河北、黑龙江、新疆等地典型膨胀土地区。土样的电导率测试采用文献[3]所述的试验方法进行, 试样含水率仍控制为 70%。自由膨胀率试验按照土工试验规程进行。电导率测试前, 先测试了试验用水的电导率为 5 ms/m, 说明试验用水对测试结果没有影响。

图 5 为上述膨胀土试样的自由膨胀率与电导率测试结果。通过线性回归分析认为, 两者的关系为

$$\delta = aS + c \quad (1)$$

式中: δ 为自由膨胀率; S 为测试土样的电导率; a 、 c 为试验系数, 在不同的地域可能有一定的差异。

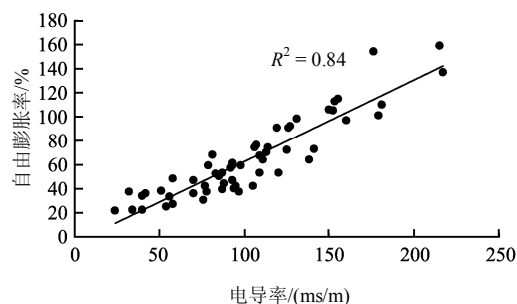


图 5 自由膨胀率与电导率的关系
Fig.5 Relationship between free swelling ration and electrical conductivity of expansive soils

本文根据广西、湖北、河南、河北、黑龙江、新疆等地典型膨胀土地区试验得到的线性关系 $\delta_{ef} = 0.8S - 18.9$, 从相关系数上看, 两者的关联程度达到 $R^2 = 0.84$, 属于高度相关。基于这一原理, 具体工程中, 可以运用其相关性进行膨胀土膨胀性等级的快速判别。

6 结 论

(1) 膨胀土泥浆浆体的离子溶解过程符合双曲线型式, 当泥浆的膨胀性能越强时, 在固定的水土比条件下, 泥浆浆体的电导率最大值越大, 半衰期越短。膨胀土中可溶离子的含量和液相电导率很好地揭示了膨胀土的导电原理。

(2) 膨胀土泥浆的电导率测试显示, 随着膨胀性的增强, 电导率增大, 电导率与膨胀性呈正相关性。因此, 可以根据电导率推测土的膨胀性。

(3) 当测试试样的含水率超过土壤液限以后, 试样的电导率与膨胀性存在单一的正相关关系。这一原理可以运用于膨胀土的现场快速判别。

参 考 文 献

- [1] 董振亮, 蒋引珊. 蒙脱石八面体层中 ($Fe^{3+}+Mg^{2+}$) 含量和晶胞参数 b_0 对蒙脱石-水体系电导的影响[J]. 硅酸盐学报, 1993, 21(1): 88—91.
DONG Zhen-liang, JIANG Yin-shan. Influence of ($Fe^{3+}+Mg^{2+}$) content in octahedron and cell parameter b_0 of montmorillonite on specific conductivity of montmorillonite-water system[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 1993, 21(1): 88—91.
- [2] 刘松玉, 查甫生, 于小军. 土的电阻率室内测试技术研究[J]. 工程地质学报, 2006, 14(2): 216—222.
LIU Song-yu, ZHA Fu-sheng, YU Xiao-jun. Laboratory measurement techniques of the electrical resistivity of soils[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2006, 14(2): 216—222.
- [3] 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.
- [4] 南京水利科学研究院. SL 273—1999 土工试验规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.
Nanjing Hydraulic Research Institute. SL 273—1999 Specification of soil test[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1999.

- [5] LI Zong-jin, WEI Xiao-sheng, LI Wen-lai. Preliminary interpretation of Portland cement hydration process using resistivity measurements[J]. **Aci Materials Journal**, 2003, 100(3): 253—257.
- [6] XIAO Lian-zhen, LI Zong-jin. Early-age hydration of fresh concrete monitored by non-contact electrical resistivity measurement[J]. **Cement Concrete Research**, 2008, 38(3): 312—319.
- [7] 孙宇瑞. 土壤含水率和盐分对土壤电导率的影响[J]. 中国农业大学学报, 2000, 5(4): 39—41.
SUN Yu-rui. Experimental survey for the effects of soil water content and soil salinity on soil electrical conductivity[J]. **Journal of China Agricultural University**, 2000, 5(4): 39—41.
- [8] 李志洪, 赵兰坡, 窦森. 土壤学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.
LI Zhi-hong, ZHAO Lan-po, DOU Sen. Soil science[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2008.
- [9] 建设部综合勘察研究设计院. GB 50021—2009 岩土工程勘察规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
Comprehensive Survey Institute of the Ministry of Construction. GB 50021—2009 Code for investigation of geotechnical engineering[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2009.
- [10] 中国建筑科学研究院. GBJ 112—87 膨胀土地区建筑技术规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 1987.
China Academy of Building Research. GBJ 112—87 Technical code for buildings in swelling soil zone[S]. Beijing: China Planning Press, 1987.
- [11] 水电水利规划设计总院. GB 50287—1999 水利水电工程地质勘察规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 1999.
China Renewable Energy Institute. GB 50287—1999 Code for geological investigation of water resources and hydropower engineering[S]. Beijing: China Planning Press, 1999.
- [12] 铁道部第一勘察设计院. TB 10038—2001 铁路工程特殊岩土勘察规程[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2001.
Railway First Survey and Design Institute. TB 10038—2001 Code for special soil and rock investigation for railway engineering[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2001.
- [13] 中交第二公路勘察设计研究院. JTG D30—2015 公路路基设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
CCC Second Highway Consultants Co., Ltd. JTG D30—2015 Specifications for design of highway subgrades[S]. Beijing: China Communications Press, 2015.
- [14] 郭爱国, 孔令伟, 陈建斌. 自由膨胀率试验的影响因素[J]. 岩土力学, 2006, 27(11): 1949—1951.
GUO Ai-guo, KONG Ling-wei, CHEN Jian-bin. Influential factors on free swell test[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(11): 1949—1951.
- [15] 陈善雄, 余颂, 柳治国, 等. 土样制备对自由膨胀率的影响及其改进方法[J]. 岩土力学, 2006, 27(8): 1327—1330.
CHEN Shan-xiong, YU Song, LIU Zhi-guo, et al. Effect of soil sample preparation on free swelling ratio and its improved measures[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(8): 1327—1330.