

用电导率测定自由膨胀率的方法研究

龚壁卫，鞠佳伟，叶艳雀

(长江科学院，水利部岩土力学与工程重点实验室，湖北 武汉 430010)

摘要：自由膨胀率是膨胀土分类判别的重要指标之一，室内自由膨胀率试验周期长、影响因素多，试验成果重复性较差。自由膨胀率和土壤电导率均与土壤的阳离子交换量、比表面积密切相关，在土壤的含水率一定的条件下，电导率是一个相对稳定的指标。因此，探索用电导率测定膨胀土的自由膨胀率可以解决自由膨胀率试验困难的问题。采用制备一定含水率条件下的膨胀土样测试了其电导率和自由膨胀率，试验成果表明：土壤电导率的量级可以用来反映膨胀土的膨胀等级。用特定含水率条件下膨胀土样的电导率可以推求土样的自由膨胀率。该成果对于研究采用电导率判别膨胀土的膨胀等级具有重要的实用意义。

关键词：膨胀土；自由膨胀率；电导率

中图分类号：TU443 文献标识码：A 文章编号：1000-4548(2011)08-1280-04

作者简介：龚壁卫(1962-)，男，教授级高级工程师，主要从事环境岩土工程以及非饱和土、膨胀土等特殊土的试验研究工作。E-mail: bwgong@126.com。

Correlative researches on free swelling ratio and electrical conductivity of expansive soil

GONG Bi-wei, JU Jia-wei, YE Yan-que

(Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Engineering of Ministry of Water Resources, Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China)

Abstract: Free swelling ratio is one of the most important indicators for the expansive soils. The laboratory test for the free swelling ratio needs a long period and has many influencing factors for the outcome. Besides, the test reproducibility is poor. The free swelling ratio and soil conductivity are both closely related to the soil cation exchange capacity and specific surface area. But when the soil moisture content is under certain conditions, the soil conductivity is a relative stability indicator. Therefore, to use the electrical conductivity to measure the free swelling rate of the expansive soil can solve the difficulties in tests for the free swelling rate. Here, certain moisture content is adopted to test the electrical conductivity and free swelling ratio of the expansive soil samples. The test results show that the soil conductivity grades can be used to reflect the expansion level of the expansive soil. Under certain moisture content, their free swelling ratio can be determined by measuring the electrical conductivity of the expansive soil samples. These achievements are of realistic significance for the researches on applying electrical conductivity to the classification of the swelling and shrinking grades of the expansive soils.

Key words: expansive soil; free swelling ratio; electrical conductivity

1 问题的提出

工程中的膨胀土判别主要采用现场定性和室内定量指标2种方法^[1]。现场定性主要是根据场区内土体工程地质特征，如地形地貌、地质年代、裂隙发育程度、充填物颜色等进行判别；室内定量指标主要分为两类：一是采用土的界限含水率(液限、塑指、缩限等)、土的粒度组成(黏粒含量、胶粒含量)、自由膨胀率等物理性指标，以及黏土矿物成分、阳离子交换量、比表面积等矿化指标综合判别；另一类是采用线膨胀率、

胀缩总率等变形指标进行判别。前一类指标可以归类为与土体的天然状态(含水率、密度)无关的非状态指标；后一类可归类为与土体的天然状态有关的状态指标。非状态指标实际反映的是土壤的亲水能力，与土壤最本质的矿物成分、化学成分等有着密切的关联；而状态指标在很大程度上受土体的天然存在状态的影

基金项目：国家“十一五”科技支撑计划“膨胀土地段渠道破坏机理及处理技术研究”课题(2006BAB04A10)

收稿日期：2010-05-31

响, 因此膨胀土的分类判别采用非状态指标更合理。

非状态指标中自由膨胀率试验由于概念明确, 仪器设备简单, 成果直观, 一直以来是膨胀土分类判别中十分重要的参数之一。根据现行《岩土工程勘察规范》和《膨胀土地区建筑技术规范》, 以及《土工试验规程》等规程规范的规定^[2-4], 自由膨胀率是以人工制备的松散的、干燥的试样, 在纯水中膨胀稳定后的体积增量与原体积之比。前人的研究成果表明, 自由膨胀率主要受土壤的矿物成分、黏粒(胶粒)含量、土化学特性等因素的影响, 是一个与土体状态无关的土壤特性参数。但是, 自由膨胀率试验也存在明显的不足, 如试样的制备、筛碾、称量、搅拌等都对测试结果均有一定影响^[5-6], 且不同的人按照规程操作的试验结果往往有较大的差异, 所以自由膨胀率试验是一项技术难度较高的试验项目。

土的电导率是表征土壤导电性能的表观参数。土壤的电导率主要取决于土壤中自由电子(离子)的种类与数量, 是与土壤矿物成分、阳离子交换量、比表面积等电化学特性密切相关的指标。由此说来, 自由膨胀率、土的电导率均是与土壤的矿物、化学特性有关的土壤特性指标, 它们之间必然存在着某种形式的联系。研究自由膨胀率与电导率的相关关系, 可以为膨胀土的判别提供一种新的思路和方法。

2 研究理论基础

根据土壤学理论^[7], 土壤中的黏土矿物具有强亲水性、离子交换性、膨胀性和可塑性等理化特性, 这些特性与颗粒的基本构造单元以及晶层结构有关。从微观角度而言, 不同的晶层结构使得黏土矿物的比表面积、离子吸附和交换特性等具有显著的区别; 从宏观角度而言, 不同的晶层结构导致土体的膨胀性、强度差异, 并影响黏性土的电化学特性、导电性能等^[8](表1)。

表1 不同黏土矿物的化学性质比较

黏土 矿物	晶层 结构	晶层 结合 力	总比表 面积 $(\text{m}^2 \text{ g}^{-1})$	阳离子 交换量 $(\text{cmol}_e \text{ kg}^{-1})$	膨 胀 性
高岭石	1:1	强	10~20	5~15	弱
伊利石	2:1	中	70~120	20~40	中
蒙脱石	2:1	弱	600~800	80~120	强

Table 1 Comparison of chemical properties among different clay minerals

Archie 利用土壤的导电性能差异研究了饱和砂岩的微结构特征。Keller 等, Mitchell, Thevanyagam, Sreedeepl 等和 Robain 用电阻率法进行土的工程特性的评价研究。缪林昌^[9]等研究了水泥土、膨胀土的电阻率特性, 提出用土的水体积比表征土的电阻率特性, 并由此建立了电阻率-水体积比与吸力-水体积比

(水分特征曲线)之间的关系, 以简化水分特征曲线的测试。这些研究成果从侧面反映了土壤的导电性能与土体结构、工程特性的关系。

在揭示土壤导电性的机理方面, 董振亮等^[10]系统的研究了黏土矿物中可交换阳离子含量与电导率的相关性, 认为黏土-水体系导电产生的原因, 除了可溶盐类之外, 主要是黏土中可交换性阳离子的存在所致, 当把蒙脱石中可溶盐除去后, 蒙脱石-水体系的导电性, 主要是由于蒙脱石层间可交换性阳离子的迁移造成的; 在蒙脱石-水体系中, 导电性阳离子的导电能力, 受蒙脱石对阳离子的束缚力所制约, 当水量远比可塑状态所需水高时, 交换性阳离子位于距黏土表面较远的地方, 并被水所分隔。分隔的距离越远, 黏土颗粒对阳离子的束缚力越小。董振亮等的试验结果显示, 无论是钠型、锌型还是铁型蒙脱石, 其水体系的电导率均与八面体层中交换性阳离子含量成线性相关, 即蒙脱石八面体层中交换性阳离子含量大, 水体系的电导率亦大; 交换性阳离子含量小, 水体系的电导亦小。对于不同类型的蒙脱石-水体系, 其相关系数为 0.95~0.99。刘松玉等^[11]研究了土壤的导电特性后认为, 土的导电性包含土颗粒表面导电与孔隙水导电两部分。其中, 孔隙水导电取决于孔隙水的含盐量与饱和度; 土颗粒表面导电取决于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, 双电层中的阳离子与阴离子在电场的作用下具有导电能力。黏粒含量增加, 土的比表面积增大, 土电导率的增加、电阻率降低。运用上述原理, 查甫生等^[12]采用电阻率法进行了膨胀土改良效果的试验测试, 成果显示, 不同养护龄期下改良膨胀土的膨胀量、膨胀力随着电阻率呈线性递减关系。通过测试改良膨胀土不同养护龄期下的电阻率, 可以准确地预测其膨胀量与膨胀力的大小。

图1 根据不同地区代表性膨胀土所测试的土样电导率与阳离子交换量的关系曲线。土样电导率测试采用一定含水率条件下的土膏测试, 阳离子交换量采用土壤学所规定的测试方法。成果表明, 阳离子交换量越大, 土样的电导率也越高, 两者呈较好的线性关系。

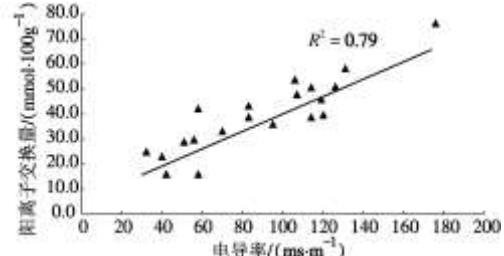


图1 电导率与土样阳离子交换量关系

Fig. 1 Relation between cation exchange capacity and electrical conductivity of soils

图2 为不同地区代表性土样液限与电导率的关系

曲线。土壤的液限代表着土壤的亲水能力，同时，也是土壤膨胀性的主要指标。土壤液限越大，说明该土壤的膨胀性也越强。试验成果表明，土壤的电导率随着液限的增大而增加，两者同样具有良好的相关性，

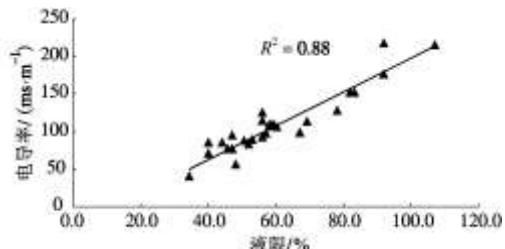


图 2 电导率与土样液限关系

Fig. 2 Relation between water limit and electrical conductivity of soils

上述的研究成果表明，土壤导电性与土壤中可交换阳离子、液限含水率密切相关，而可交换阳离子数量的多少以及液限大小，决定了黏性土膨胀性的大小，因此，土壤的电导率可以用来反映土壤膨胀性的大小，通过建立电导率与自由膨胀率的关系可以实现对膨胀土膨胀等级的划分。

3 试验过程

在土壤电导率测试中，土壤的含盐量和含水率是影响电导率的主要因素。一般而言，膨胀性土的可溶盐含量较低，且保持在一定的数量级，因此，其导电性主要取决于黏土颗粒表面双电层中的可交换阳离子数量。有关含水率的影响，孙宇瑞等^[13]通过比较试验，研究了土壤含水率对电导率的影响。认为：当土壤含水率在 15%~30% 变化时，土壤含水率对电导率的影响最为显著，且两者间近似为线性关系；当含水率超过 30% 以后，土壤电导率的变化趋势明显减缓，并趋于稳定。林义成等^[14]通过室内试验测试了不同土壤含水率对电导率的影响，试验成果也表明，当土壤的含水率超 35% 以后，含水率与电导率的关系趋于平缓。

依据上述理论，在室内开展了电导率和自由膨胀率的相关关系试验研究。电导率试验土样和探头见图 3。试样分别选择南水北调中线工程典型渠段的膨胀土、岩以及其它地区的膨胀土、一般黏性土等。典型地区土样包括邯郸强膨胀土，新乡中膨胀黏土岩、弱膨胀泥灰岩，南阳中膨胀土、弱膨胀土，襄樊、枣阳、荆门、镇江等地的中、弱膨胀土，广西南友路中膨胀土，及长河坝、密松水电站等地区的黏土、粉质黏土。

自由膨胀率试验按《土工试验规程》进行：用四分法取 20~30 g 土样放进 105℃~110℃烘箱中烘至恒重后，再将土样从烘箱中取出，放入干燥箱中冷却至室温，按上述规程测试土样的自由膨胀率。

土壤电导率试验：取上述代表性土样 100~150 g，

先放进 105℃~110℃烘箱中烘至恒重，再将土样取出，置于干燥箱中冷却至室温。然后根据干土质量称相应质量的纯水（去离子水），配成高含水率（本试验设定为 70%）状态的土膏，用玻璃棒将土水搅拌均匀，用 W.E.T 土壤电导率探头测试土样的电导率，并在测试完成后，烘干剩余土样，实测土样含水率。本试验土样统一采用相同的含水率控制，主要是考虑以下因素：①由于土壤的电导率很大程度上受溶液浓度的影响，不同的含水率条件下，土壤的电导率不同，因此，配置相同含水率状态的土样可以消除由于土样含水率差异对电导率测试的影响；②配置高含水率状态的土膏，是基于前人的研究成果：当含水率超过一定的限度以后，土样的电导率变化趋于平缓；③配置土膏状的土样便于土样含水率均匀拌合，土样的导电性能可更充分的发挥。考虑到一般膨胀土最高液限可达 70%，故设计试验土样的控制含水率为 70%。土样电导率试验前，测试了调土用纯水的电导率为 2 ms/m，说明试验用水的电导率不会对试验成果构成显著影响。



图 3 电导率试验土样和探头

Fig. 3 Soil samples and conductivity probes for tests on electrical conductivity

4 试验成果及分析

按照上述试验方法，分别进行了不同地区代表性土样的自由膨胀率和电导率测试。根据电导率试验结束后试样烘干测试含水率成果，土样的制备含水率基本控制在 70% 的±1% 范围以内，说明试验成果可以排除土样因含水率不同导致的试验误差。土样自由膨胀率与电导率的关系曲线如图 4 所示。

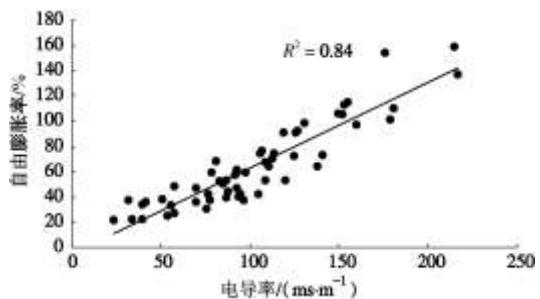


图 4 自由膨胀率与电导率的关系

Fig. 4 Relation between free swelling ratio and electrical conductivity of soils

图 4 为试样的自由膨胀率与含水率为 70% 的试样

的电导率关系曲线。曲线图形显示, 自由膨胀率增加电导率增大, 土样的电导率与自由膨胀率呈较好的线性关系。根据曲线相关性回归分析, 两者的相关系数达到 0.84, 其相关关系可以用公式: $\delta_{ef} = a\sigma + b$ 表达。其中, δ_{ef} 为土样的自由膨胀率, σ 为含水率为 70% 条件下土样的电导率, a , b 为试验测定系数。

根据上述的相关关系, 在实际工程中, 可以采用特定含水率条件下膨胀土样的电导率来推求土样的自由膨胀率, 根据推测的自由膨胀率来进行膨胀等级的划分, 从而实现在现场用快速测定土样电导率的方法对膨胀土进行快速判别的目的。

5 结语

通过对土壤导电性能的机理分析, 论述了土壤矿物成分、化学成分和结构对土壤导电性能的影响, 从理论上分析了膨胀土的膨胀性与导电性的相关关系。运用土样的自由膨胀率试验、一定含水状态的电导率测试试验成果, 初步揭示了膨胀土自由膨胀率与电导率的相关关系。试验结果显示, 土壤的电导率与膨胀土的膨胀特性密切相关, 膨胀土自由膨胀率与电导率呈较好的线性关系。实际工程中, 可以通过事先率定的电导率与自由膨胀率的关系曲线, 通过测试电导率的方法来推求土壤的自由膨胀率, 从而实现用电导率进行膨胀土的快速判别。

参考文献:

- [1] 刘特洪. 工程建设中的膨胀土问题[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997. (LIU Te-hong. Problems related to expansive soil in engineering constructions[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1997. (in Chinese))
- [2] GB50021—2001 岩土工程勘察规范[S]. 2001. (GB50021—2001 Code for investigation of geotechnical engineering[S]. 2001. (in Chinese))
- [3] GBJ112—87 膨胀土地区建筑技术规范[S]. 1987. (GBJ112—87 Technical Specifications for Construction Ground In Expanding Soil Areas[S]. 1987. (in Chinese))
- [4] SL237—1999 土工试验规程[S]. 1999. (SL237—1999 Specification of soil test[S]. 1999. (in Chinese))
- [5] 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. (in Chinese))
- [6] 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. (in Chinese))
- [7] 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 Shen. Soil science[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2008. (in Chinese))
- [8] 张明柱. 土壤学与农作学[M]. 北京: 水利电力出版社, 1992. (ZHANG Ming-zhu. Science of Soil and farming[M]. Beijing: China WaterPower Press, 1992. (in Chinese))
- [9] 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. (in Chinese))
- [10] 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 对蒙脱石一水体系电导的影响[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. (in Chinese))
- [11] 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(02): 216—222. (LIU Song-yu, ZHA Fu-sheng, YU Xiao-jun. Laboratory measurement techniques of the electrical resistivity of soils[J]. Journal of Engineering Geolog, 2006, 14(02): 216—222. (in Chinese))
- [12] 查甫生, 刘松玉, 杜延军, 等. 电阻率法评价膨胀土改良的物化过程[J]. 岩土力学, 2009, 30(6): 1171—1178. (ZHA Fu-sheng, LIU Song-yu, DU Yan-jun, et al. Evaluation of physicochemical process in stabilized expansive soils using electrical resistivity method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(6): 1171—1178. (in Chinese))
- [13] 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. (in Chinese))
- [14] 林义成, 丁能飞, 傅庆林, 等. 土壤溶液电导率的测定及其相关因素的分析[J]. 浙江农业学报, 2005, 17(2): 83—86. (LIN Yi-cheng, DING Neng-fei, FU Qing-lin, et al. The measurement of electric conductivity in soil solution and analysis of its correlative factors[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2005, 17(2): 83—86. (in Chinese))