

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2010.05.018

电渗法中含水率和电势梯度对土体电阻率的影响

储旭,刘斯宏,王柳江,徐伟,汪俊波

(河海大学水利水电学院,江苏南京 210098)

摘要:采用 Miller Soil Box 方法分别测定同一压力状态、同一温度下 3 种不同土样的电阻率,分析了含水率和电势梯度对土体电阻率的影响,拟合出土体电阻率的计算公式.结果表明:土体电阻率与含水率有很大关系,大致以液限为分界,当含水率大于液限时,土体电阻率较小,且随含水率变化较小;当含水率小于液限时,土体电阻率较大,且随含水率减小而急剧增大.对于一定含水率的土体,土体电阻率随电势梯度的增大而减小.

关键词:电渗;电阻率;电势梯度;含水率

中图分类号:U414 文献标志码:A 文章编号:1000-1980(2010)05-0575-05

由于电渗法具有对土颗粒大小不敏感的特点,近年来开始应用于港口建设和围垦工程中高黏粒含量、低渗透性吹填土的排水加固中.影响电渗效果的因素很多,主要有电阻率、电势梯度、含水率等^[1-2],其中电阻率是一个表征土体导电性能的基本参数^[3-4].

自 Archie 利用土体电阻率方法研究饱和砂岩的微结构特征以来,许多学者对土体电阻率进行了理论与试验研究,提出了许多土体电阻率的计算公式,其中比较典型的有:

Archie^[5]于 1942 年提出的饱和砂土的电阻率公式

$$\rho = a\rho_w n^{-m} \tag{1}$$

式中: ρ ——土体电阻率; ρ_w ——孔隙水电阻率; a ——土性参数; m ——胶结系数; n ——孔隙率.

Keller 等^[6]在 1966 年基于 Archie 饱和砂土的电阻率公式提出的非饱和砂土电阻率公式

$$\rho = a\rho_w n^{-m} S_r^{-p} \tag{2}$$

式中: S_r ——饱和度; p ——饱和度指数.

Waxman 等^[7]于 1968 年提出的表面导电性良好的非饱和黏土电阻率公式

$$\rho = \frac{a\rho_w n^{-m} S_r^{1-p}}{S_r + \rho_w BQ} \tag{3}$$

式中: B ——双电层中与土颗粒表面电性相反电荷的电导率; Q ——单位土孔隙中阳离子交换容量; BQ ——土颗粒表面双电层电导率.式(3)建立在土颗粒与孔隙水两导体并联的基础上,忽略了孔隙水和土颗粒的相互传导作用,存在一定的不合理性^[8-9].

目前探讨的土体电阻率一般未考虑在直流电作用下的电化学反应,而在电渗过程中,直流电必然会使土体发生电化学反应,其程度随电势梯度的变化而变化,因此,电渗时土体的电阻率和电势梯度有关.本文针对 3 种不同的土样,分别测定了不同含水率和不同电势梯度下的电阻率,分析含水率和电势梯度对电阻率的影响规律,拟合得到电渗时土体电阻率的计算公式.

1 土体电阻率测试

本文试验选取了分别代表海相土、一般土与湖相土的 3 种土样,其基本物理参数如表 1 所示.

图 1 为土体电阻率测试装置示意图.该测试装置称为 Miller Soil Box,它包括一个内径 6.86 cm、长 5.5 cm

表 1 试验土样的基本物理参数

Table 1 Basic physical parameters of soil samples

试验土样	液限/%	塑限/%	渗透系数/ ($10^{-8}\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)	黏粒质量 分数/%	取土地点
土样 1	50.3	24.3	5.2	58.7	大连大窑湾
土样 2	29.2	20.1	5000.0	30.0	南京江心洲
土样 3	23.7	19.7	26.0	41.2	洪泽湖

的 PVC 圆柱筒与 2 片带有数个直径 2 mm 排水孔的测试铝片. 试验时, 先将试验土样装入 PVC 圆柱筒中, 然后在圆柱筒的两端土体表面各放上 1 片湿润的滤纸, 使铝片与滤纸紧密接触, 再用导线将铝片与直流电源相连, 形成一个测试回路. 参照 McCarter 等用类似 Miller Soil Box 测试击实土体电阻率的方法^[10-12], 不同含水率的试验土样由烘干土样与取样地点的水均匀调制而成, 装入 Miller Soil Box 后在相同的压力(10 kPa)下固结 24 h, 固结完成后 2 片铝片的间距计为 l , 即为试样压缩后长度. 对于某一含水率的土样, 在两端面间从小到大施加不同的电压值 U (单位为 V), 每次调整电压值后, 待电路稳定(约 20 s)测定相应的电流 I (单位为 A), 则土样的电阻率为

$$\rho = \frac{U}{I} \frac{F}{l}$$

(4)

式中: ρ ——电阻率 $\Omega\cdot\text{cm}$; F ——试样端面面积 cm^2 .

2 试验结果分析

由于试验得到的 3 种土体电阻率 ρ 与电势梯度 E 和含水率 w 的关系基本相同, 本文以土样 1 为例进行分析, 其结果如图 2 所示.

2.1 电阻率与电势梯度的关系

图 3 为试验土样 1 在 $w = 74.1\%$ 时电阻率随电势梯度的变化, 图中同时给出土样 1 所含的海水电阻率. 可见, 与一般的导体不同, 本次试验所测的土体电阻率与电势梯度有关. 当电势梯度较小时, 土体电阻率随电势梯度的增大而迅速减小, 电势梯度增大到一定值时, 土体电阻率变化幅度减小, 并逐渐趋于稳定. 此现象可以从电化学的角度来解释. 饱和土体是土颗粒与孔隙水的混合物, 土颗粒实际是不导电的($\rho > 6000 \Omega\cdot\text{cm}$), 因此导电的主要介质是孔隙水. 土样 1 中孔隙水(海水)的电阻率与其离子的电解平衡状态有关, 不同的电势梯度对应于不同的电解平衡状态, 所以不同电势梯度下的土体电阻率不一样. 离子的电解反应随电势梯度的增大而增大, 但增大到一定程度时, 其变化趋于稳定, 所以电阻率也趋于稳定^[13].

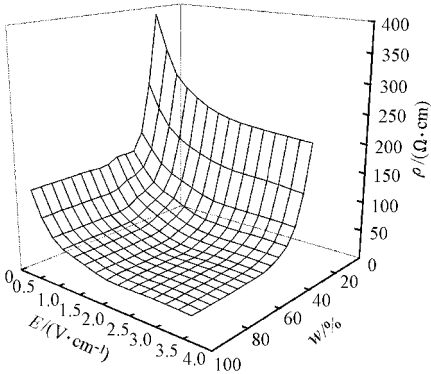


图 2 土样 1 电阻率与电势梯度和含水率的关系
Fig. 2 Variation of electrical resistivity of Sample 1 with water content and potential gradient

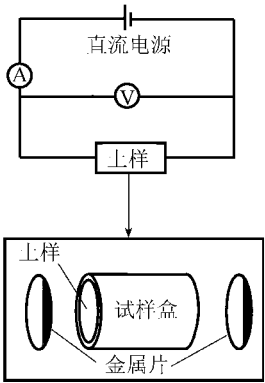


图 1 用 Miller Soil Box 测试土体电阻率示意图
Fig. 1 Tests on electrical resistivity by use of Miller Soil Box

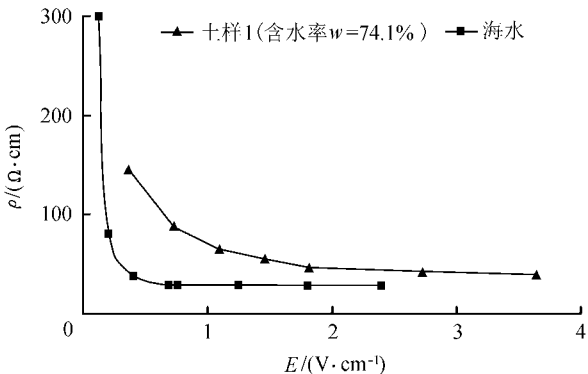


图 3 土样 1 海水电阻率和电势梯度的关系
Fig. 3 Variation of electrical resistivity of Sample 1 and seawater with potential gradient

2.2 电阻率和含水率的关系

从图 2 可以看出,土体电阻率随含水率的变化规律与其随电势梯度的变化规律基本相同,即随含水率的增大而减小.土样 1 的液限 $w_L=50.3\%$,电阻率随含水率的变化大致以此为分界点.当含水率小于液限时,土体电阻率随含水率的变化较大;当含水率大于液限时,土体电阻率随含水率的变化较小,并逐渐趋于稳定.这是因为当土体含水率小于液限时,土中液相主要为黏结水与黏滞水,重力水很少,土体固体颗粒所占的份额大,因而土体固体颗粒的电阻率很大.当土体含水率增加时,土体中水分之间的连接重新建立,导电横截面积增大,土体电阻率相应减小;当土体含水率高于液限时,固体颗粒所占份额减小,土中水分之间的连接增强,逐渐连接成片,此时土体导电主要通过液相,而液相的电阻率本身很小,因此土体电阻率随含水率的变化相对较小.

3 试验结果曲线拟合

图 4 给出了 3 种试验土样在不同含水率下电阻率随电势梯度变化的试验结果.此试验结果可以用幂函数进行拟合:

$$\rho = aE^{-b} \tag{5}$$

式中: ρ ——土体电阻率; a, b ——与含水率有关的系数,即 $a = a(w), b = b(w)$.

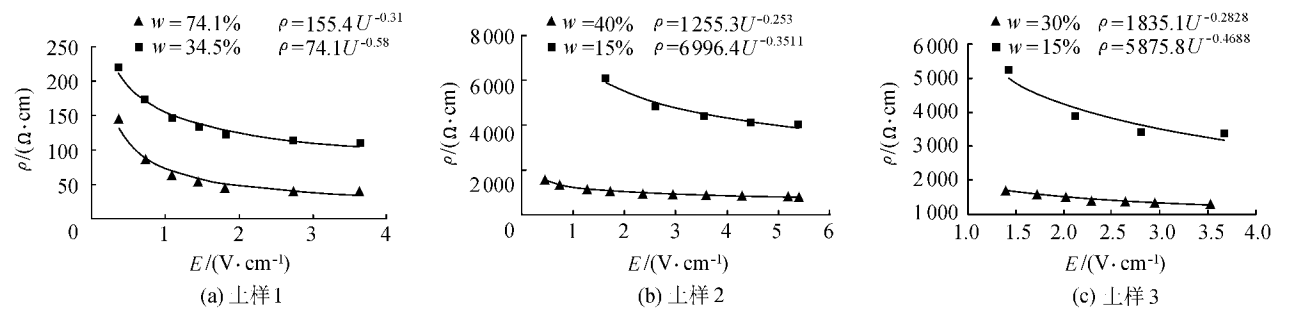


图 4 不同含水率下土样电阻率和电势梯度的拟合曲线

Fig. 4 Fitting curves of electrical resistivity of soil samples under different water contents and potential gradients

图 5、图 6 分别为采用式(5)拟合 3 种试验土样的电阻率得到的 a, b 值,它们都只随含水率变化.可见,系数 a 的倒数 $1/a$ 值与含水率的关系曲线大致可以以土体液限为分界点分为 2 个区段:当含水率小于液限时, $1/a$ 值随含水率的增加而线性增大;当含水率大于液限时, $1/a$ 值基本不随含水率的变化而变化,可假定为一个常数.因此, $1/a$ 值可以拟合为

$$1/a = \begin{cases} dw_L + e & (w \geq w_L) \\ dw + e & (w < w_L) \end{cases} \tag{6}$$

式中 d 和 e 为常数.

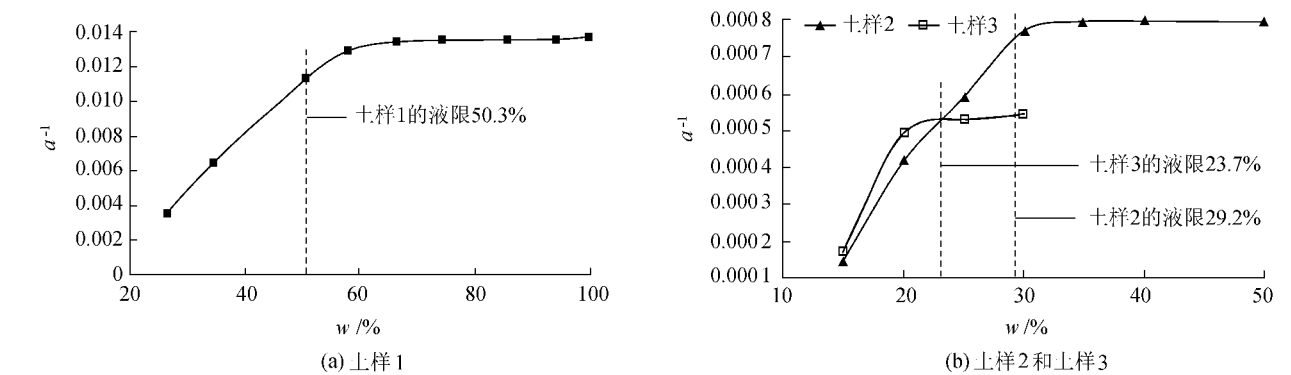


图 5 系数 $1/a$ 和含水率的关系曲线

Fig. 5 Relation between coefficient $1/a$ and water content

同样,系数 b 值与含水率的关系曲线大致也可以以土体液限为分界点分为 2 个区段,拟合为

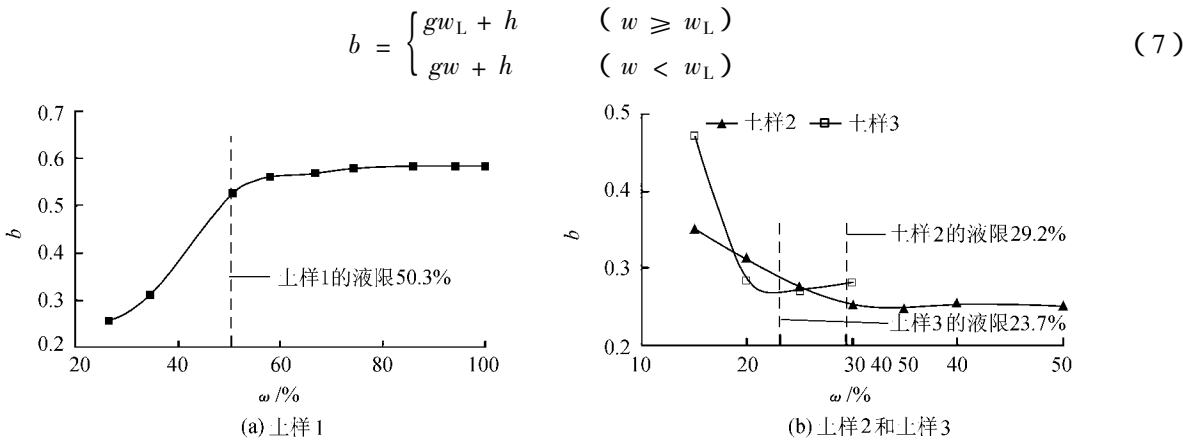


图6 系数 b 和含水率的关系曲线

Fig. 6 Relation between coefficient b and water content

综合式(5)~(7)可得

$$\rho = \begin{cases} \frac{1}{dw_L + e} E^{-(gw_L + h)} & (w \geq w_L) \\ \frac{1}{dw + e} E^{-(gw + h)} & (w < w_L) \end{cases} \quad (8)$$

式中 d, e, g, h 为常数. 3种试验土样的拟合参数 d, e, g, h 见表2.

研究表明:土体电阻率与土样温度也有一定的关系^[14]. 式(8)未考虑温度的影响, 需要进一步研究.

4 结 论

a. 土体导电主要通过土体中的液相介质, 因此, 土体电阻率与含水率有很大关系. 大致以液限为分界, 当含水率小于液限时, 土体电阻率随含水率的增大而减小, 当含水率大于液限时, 土体电阻率随含水率的变化较小.

b. 电渗时土体电阻率与电势梯度有很大的关系. 在高电势梯度下, 土体液相离子的电解程度大, 电阻率降低; 反之, 土体液相离子的电解程度低, 土体电阻率较大.

c. 根据土体电阻率的特性, 高含水率土体的电阻率小, 电渗时会产生较大的电流, 消耗电能大, 电渗成本高, 因此电渗不适合高含水率土体; 对于一定含水率的土体, 为了保证电渗效果, 需要施加较高的电势梯度, 但是由于高电势梯度下土体电阻率较小, 会产生很高的电流, 使得电渗成本增加, 因此, 电渗工程中需要选择合适的电势梯度.

参考文献:

[1] HEISTER K, PIETER J K, THOMAS J S K et al. A new laboratory set-up for measurements of electrical, hydraulic and osmotic fluxes in clay[J]. Engineering Geology, 2005, 77: 295-303.

[2] CHEN Jian-long, MURDOCH L. Effect of electroosmosis on natural soil: field test[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1999, 125(12): 1090-1098.

[3] 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 Geotechnical Engineering, 2006, 14(2): 216-222. (in Chinese))

[4] 刘国华, 王振宇, 黄建平. 土的电阻率特性及其工程应用研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(1): 83-87. (LIU Guo-hua, WANG Zheng-yu, HUANG Jian-ping. Research on electrical resistivity feature of soil and its application[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(1): 83-87. (in Chinese))

[5] ARCHIE G E. The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics[J]. Petroleum Transactions of AIME,

1942 ,146 :54-62.

- [6] KELLER G V ,FRISCHKNECHT F C. Electrical methods in geophysical prospecting[M]. Oxford :Pergamon Press ,1966 :1-43.
- [7] WAXMAN M ,SMITS L. Electrical conductivity in oil bearing shaly sands[J]. Soc Petrol Eng J ,1968 ,243 :107-122.
- [8] 查甫生 ,刘松玉 ,杜延军 ,等 .非饱和黏性土的电阻率特性及其试验研究[J]. 岩土力学 ,2007 ,28(8) :1671-1676.(ZHA Fu-sheng ,LIU Song-yu ,DU Yan-jun ,et al. The electrical resistivity characteristics of unsaturated clayey soil[J]. Rock and Soil Mechanics ,2007 ,28(8) :1671-1676.(in Chinese))
- [9] 蒋建平 ,阎长虹 ,徐鸣洁 ,等 .苏通大桥地基中深厚软土电阻率试验研究[J]. 岩土力学 ,2007 ,28(10) :2077-2082.(JIANG Jian-ping ,YAN Chang-hong ,XU Ming-jie ,et al. Experimental study on electrical resistivity of thick soft soil in foundation of Su-Tong Yangtze River Bridge[J]. Rock and Soil Mechanics ,2007 ,28(10) :2077-2082.(in Chinese))
- [10] MCCARTER W J. The electrical resistivity character of compacted clay[J]. Geotechnique ,1984 ,34(2) :263-267.
- [11] KAMINSKI R ,KELLY W. Electrical-resistivity measurements for evaluating compacted soil liners[J]. Journal of Geotechnique Engineering ,1994 ,120(2) :451-457.
- [12] ABU-HASSANEIN Z ,BENSON C ,BLOTT L. Electrical resistivity of compacted clays[J]. Journal of Geotechnical Engineering ,1996 ,122(5) :397-406.
- [13] 聂向晖 ,杜鹃 ,杜翠薇 ,等 .大港土电阻率的测量及其导电模型[J]. 北京科技大学学报 ,2008 ,30(9) :981-985.(NIE Xiang-hui ,DU He ,DU Cui-wei ,et al. Electrical resistivity measurement and conductive model of Dagang soil[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing ,2008 ,30(9) :981-985.(in Chinese))
- [14] CAMPBELL R B ,BOWER C A ,RICHARD L A. Change in electrical conductivity with temperature and the relation with osmotic pressure to electrical conductivity and ion concentration for soil extracts[J]. Soil Science ,1948 ,13 :33-69.

Influences of water content and potential gradient on electrical resistivity of soil in electro-osmosis method

CHU Xu , LIU Si-hong , WANG Liu-jiang , XU Wei , WANG Jun-bo

(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering , Hohai University , Nanjing 210098 , China)

Abstract : The electrical resistivity of three different kinds of soil samples under the same consolidated pressure and temperature was measured by use of the Miller Soil Box. The influences of water content and potential gradient on the electrical resistivity of soil samples were investigated. A formula for the electrical resistivity of soils was established. The test results indicate that the electrical resistivity of soils is greatly related to the water content. When the water content is larger than the liquid limit of soils , the electrical resistivity of soils is relatively small and varies little with the water content. When the water content is less than the liquid limit , the electrical resistivity of soils is relatively large and rapidly increases with the decrease of the water content. For the soils with certain water content , the electrical resistivity of soils decreases with the increase of the potential gradient.

Key words : electro-osmosis ; electrical resistivity ; potential gradient ; water content