

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2013.01.012

电极布置形式对电渗加固软土效果的影响试验

王柳江¹, 刘斯宏¹, 朱 豪², 吴 澎³

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 南水北调中线干线建设管理局, 北京 100038;
3. 中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007)

摘要: 在自制的模型箱中同时进行3组不同电极布置形式(1根阴极分别对应1根、4根和8根阳极)下的电渗排水试验,通过监测电渗过程中排水量、沉降量、孔压和电流来研究不同电极布置形式对电渗排水的影响,并测试电渗结束后土体的含水率和强度,研究电极布置形式对电渗加固效果的影响。试验结果表明:阴极周围布置的阳极越多则电渗的排水与加固效果越明显;电流随电渗时间呈指数衰减;土体单位体积排水量与能量消耗之间呈线性关系。

关键词: 电渗;电极布置形式;软土加固;能量消耗

中图分类号: TV223.2⁺6; TU471.8 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2013)01-0064-06

Experimental study of effects of electrode configuration on electroosmosis reinforcement for soft soil

WANG Liujiang¹, LIU Sihong¹, ZHU Hao², WU Peng³

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Construction and Administration Bureau of South-to-North Water Diversion Middle Route Project, Beijing 100038, China;
3. CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China)

Abstract: Three laboratory model tests were conducted to investigate the effects of electroosmosis drainage in different electrode configurations. The drainage, settlement, pore water pressure, and current were monitored in the process of electroosmosis. The water content and shear strength of the soil were obtained after electroosmosis, in order to study the effects of electrode configuration on electroosmosis reinforcement. The experimental results show the following: the effects of drainage and reinforcement by electroosmosis significantly improved with the increase of the number of anodes around a cathode, the current exhibited exponential attenuation with time, and there was a linear relationship between energy consumption and drainage discharge per unit volume.

Key words: electroosmosis; electrode configuration; soft soil reinforcement; energy consumption

电渗法作为一种地基加固技术已经成功地应用于边坡、斜坡、水坝加固以及土体开挖稳定、提高桩基承载力等岩土工程中^[1-5]。然而,由于其复杂的作用机制及影响因素,使该技术在较长的一段时间内无人问津。随着我国港口的大规模开发建设,采用水力吹填进行围海造陆的工程不断涌现,由于大部分吹填形成的超软黏土具有高含水率、高黏粒含量以及低渗透性的特点,导致地基固结排水速率缓慢而亟需处理,电渗法重新引起了岩土界的关注和研究。

近几年,国内外不少学者从不同方面对电渗法进行了研究:王协群等^[6]研究了电极转换技术对电渗排水的影响;Micic等^[7]对海相淤泥采用间歇电渗法进行加固处理,并确定了合理的间歇通电时间;Fabien等^[8]研究化学注浆方法改善阳极和土体之间的接触来提高电渗处理效果;胡俞晨等^[9]采用电动土工合成材料(EKG)作为电极来抑制电极反应;Rittirong等^[10]研究不同电极排布方式对沉箱周围土体加固效果的影响,

收稿日期: 2012-02-14

基金项目: 江苏高校优势学科建设工程项目(PAPD);中央高校基本科研业务费专项(2010B20114)

作者简介: 王柳江(1985—),男,浙江武义人,讲师,博士,主要从事地基处理及岩土数值分析研究。E-mail:liuj_w@yahoo.cn

结果表明优化电极布置形式可以有效提高电渗的加固效果;Shang^[11]和王柳江等^[12]分别研究了电渗法与堆载预压和真空预压的组合效果;汪俊波等^[13]和李瑛等^[14]研究了电流密度和电压对电渗的影响,以此确定合理的电渗电流密度和电压;储旭等^[15]研究了电渗中含水量和电势梯度对土体电阻率的影响。在理论上,庄艳峰等^[16]从电学的角度对电渗进行了理论分析和研究,推导出了界面电阻的计算式;徐伟等^[17]推导了真空预压联合电渗法加固软基的固结方程。综上所述,电渗法的研究虽已达到了较全面的程度,但电渗法的加固效果与电场强度之间关系紧密,因此工程中电极材料和电极布置形式的选取尤为重要。

为研究电极布置形式对电渗法加固效果的影响,笔者在自制的模型箱中同步进行了 3 组不同电极布置形式下的电渗排水试验,通过排水量、沉降量、孔压、电流、含水率以及土体强度之间的对比分析确定电极布置形式对电渗排水、加固软土的影响。

1 试验概况

1.1 试验土样

试验土样取自大连港大窑湾港区三期工程 19~22 号泊位堆场泥塘区,为开挖港池的吹填海相淤泥土,以流泥、淤泥为主,其物理性质指标如下:液限为 50.3%,塑限为 24.3%,压缩系数为 1.66 MPa^{-1} ,渗透系数为 $5.2\times 10^{-8}\text{ cm/s}$,体积含水率为 92.3%,黏粒所占质量分数为 52.4%。

1.2 试验装置及过程

试验在自制的顶部开敞的模型箱内进行。模型箱长×宽×高为 40 cm×40 cm×60 cm,由钢化玻璃制成。阳极和阴极的材料均为长 45 cm、直径 1 cm 的钢筋,为防止进入阴极的电流过大而导致其温度过高,阴极由 2 根钢筋绑扎而成。选择钢筋作为电极主要是考虑到钢筋在实际情况下具有如下优点:(a)强度高,便于布置;(b)成本低廉,容易获取;(c)与其他电极材料相比,无环境污染问题;(d)即使在被氧化的情况下,导电性仍然较强。为将汇集到阴极的水排出,将截面尺寸为 100 mm×4 mm 的塑料排水板由阴极边上插入土体,然后采用硬质皮管将其与真空泵连接。试验共分 3 组,分别为 1 根阴极对应 1 根阳极(方案 1)、1 根阴极对应 4 根阳极(方案 2)和 1 根阴极对应 8 根阳极的情况(方案 3)。各组试验布置情况如图 1 所示,电极间距为 15 cm。装土前,先在模型箱内壁涂抹凡士林,而后贴上保鲜膜,以抵消侧壁摩擦力的作用;然后将土样装至高度 40 cm,并在土样表面设置厚度 3 mm 的有机玻璃板,以便于沉降观测,同时防止水分蒸发。有机玻璃板经预打孔处理,可将电极和排水板插入土体,且将与孔压计相连的数据线引出。

试验电源采用 KDF 可控式电析降水仪,为稳压直流电源,能够提供最大 50 V 的输出电压和最大 10 A 的输出电源。试验所用真空泵额定功率为 180 W,抽气速度为 10 L/min,气水分离装置采用 ZK-270 型真空饱和缸,将其放置在电子秤上通过称量测定排水量。每组试验中各安装 1 个电流表和孔压计以及 2 支位移计,沉降结果分析时按均值处理。试验开始前土样先自重固结 24 h,待排除由自重固结产生的自由水后,通过阴、阳极施加 5 V 的稳压,然后每隔 2 h 测量 1 次电流、排水量、沉降量和孔压,试验共持续 335 h。试验过程中由于仪器故障暂停了 2 次,暂停时间分别为 25 h 和 51 h。试验结束后,对方案 2 和方案 3 中的土体分层分区域取样,测定其体积含水率和强度。

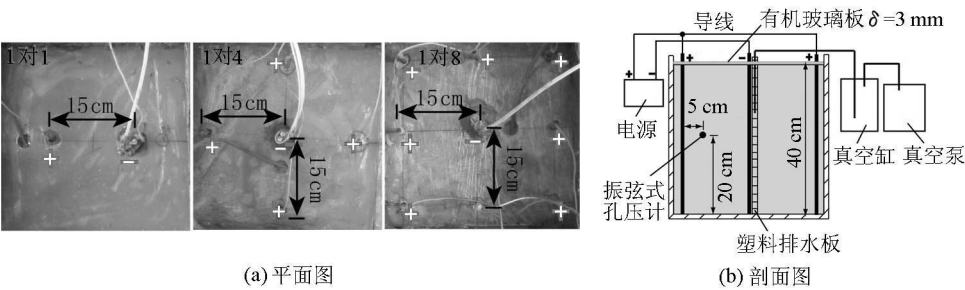


图 1 电渗排水试验装置示意图

Fig. 1 Layout and setup of electroosmosis drainage test

2 试验结果及分析

2.1 排水量、沉降量和孔隙水压力

根据 Esrig^[18]电渗理论可知排水量与电场强度有关,而电场强度的大小与电压和电极布置形式关系密切。单位体积排水量表示排出水的体积 Q 与土样初始体积 V_{s0} 之比(Q/V_{s0}),图2 单位体积排水量随时间的变化曲线说明了电渗排水量随阴极周围阳极布置数量的增加而增大,且方案2 和方案3 的排水量分别为方案1 的3 倍和6 倍。图2 还表明方案1 和方案2 的排水进入不排和排水速率减缓阶段时,方案3 的排水速率基本保持不变,说明增加阴极周围的阳极数量可延长电渗稳定排水阶段的时间。沉降方面,试验结束后3 组试验土体的最终沉降量分别占土样初始高度的7.47%,13.40%和18.90%,且由图3 可见电渗引起的土体表面沉降随时间的变化规律与排水量的变化规律基本接近,说明电渗引起的土体体积变化主要由排水引起。图4 表示孔压计埋设点的孔压变化规律。由图4 可见,由于电渗带动阳极水往阴极移动,从而导致阳极周围土体中产生负孔压(吸力),进而有效加固该区域的土体,且随着电渗的持续,吸力持续增大直至达到稳定值;在间歇通电期,由于阴极周围土体水头大于阳极,根据达西定律可知水由阴极往阳极流动,因此阳极周围土体的孔压有所回弹;在阴极周围布置的阳极数量越多,由电渗引起的土体吸力增量越大,说明土体的加固效果越明显。

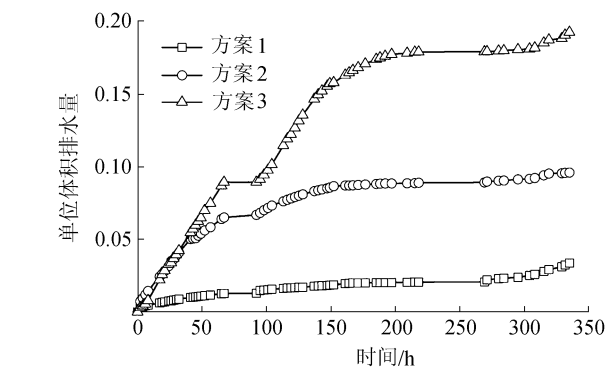


图2 单位体积排水量随时间变化曲线

Fig. 2 Variation of drainage discharge per unit volume over time

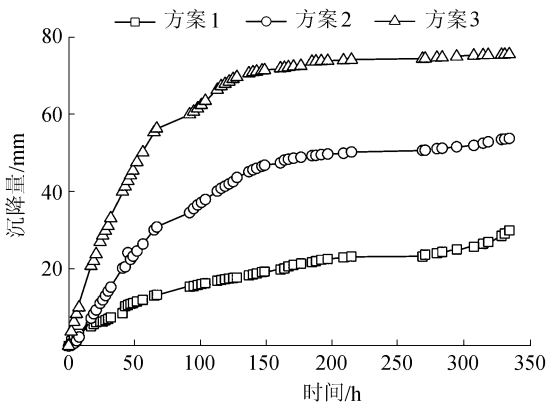


图3 沉降量随时间变化曲线

Fig. 3 Variation of settlement over time

2.2 电流、排水速率和排水量之间的关系

图5 为3 组试验得到的单位体积排水速率与电流的关系。由图5 可见单位体积排水速率与电流间呈较好的线性关系,且从3 组试验的统计结果看该特性具有普遍规律性。上述规律可从电渗中土体的导电机理进行解释:土体导电主要靠离子运动,电流大则离子迁移速率快,带动极化水分子的运动速率和数量也相应增大,由此排水速率增大。由图6 可以发现在3 种不同电极布置形式的电渗过程中,电流通常随单位体积排水量的增大而减小,且两者之间也能较好地满足线性关系。这是由于在恒定电压下电流与土体的电阻成反比,而黏土的电阻又受含水率的影响,同时单位体积排水量决定了土体的含水率变化,因此土体中电流随着单位体积排水量的增加逐渐减小。

为了解电渗过程中电流的变化规律,可采用图5 和图6 中的拟合关系式进行推导:

$$v = \frac{\partial q}{\partial t} = aI \tag{1}$$

$$I = -bq + I_0 \tag{2}$$

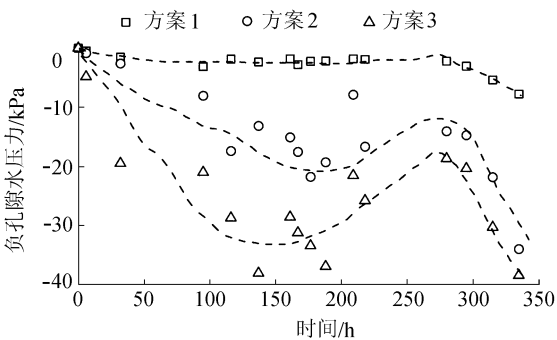


图4 孔压随时间变化曲线

Fig. 4 Variation of pore water pressure over time

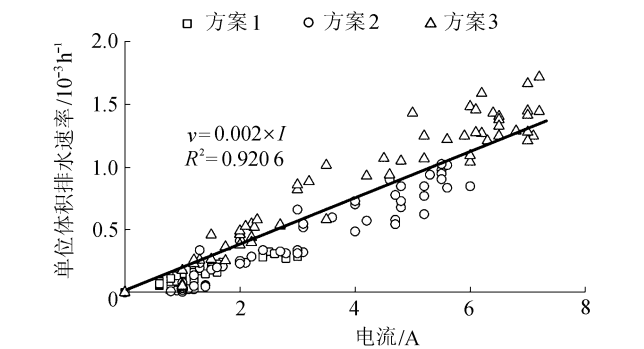


图 5 排水速率与电流的关系

Fig. 5 Relationship between drainage rate and current

将式(2)代入式(1)后得到一阶微分方程：

$$-\frac{1}{b}\frac{\partial I}{\partial t}=aI$$

(3)

则电流与电渗时间之间的函数关系式为

$$I=I_0e^{-abt}$$

(4)

式中： v ——单位体积排水速率， h^{-1} ； q ——单位体积排水量； t ——时间， h ； a, b ——拟合参数； I_0 ——初始电流， A 。

由式(4)可知电流随电渗时间呈指数衰减趋势。图 7 表示电渗过程电流实测值与预测值的对比情况，可以发现 3 组试验中的实测值与预测值基本相等，表明该模型能够预测电渗过程中电流的变化情况。

2.3 试验结束后土体体积含水率和强度

图 8 为电渗结束后土体的体积含水率分布曲线。从图 8 可以看出，大部分试验结果规律相同，水平方向阳极周围土体体积含水率最低，竖向则是土体表面最低。方案 2 和方案 3 的土体体积含水率分布规律有所不同，方案 2 中最高含水率不在阴极周围，而是在两极中间。这与电场强度的大小及其在土体中的不均匀分布有关，当阴极周围布置的阳极数量增加时土体内的电场强度增大，且在阳极到阴极之间趋向于均匀分布，此时两极间土体中的水可持续均匀地往阴极流动；当阴极周围的阳极数量较少时两极间的电场强度较小，且根据 Zhuang 等^[16]的试验可知电场强度呈不均匀分布，通常阳极和阴极周围土体中的电场强度较大，根据电渗流计算公式可知此时两极中间土体中水的流速最小，结果导致部分水分在此积累，同时电渗条件下土体导电率不均匀分布也是导致其含水率异常分布的部分原因。文献[19]表明只要电渗时间足够长，土体体积含水率分布将恢复到一般情况。

试验后分别选取不同层、不同区域的土样进行不排水无侧限压缩试验，试验在小型三轴仪上进行，试样直径 3.65 cm，高度 10 cm。图 9 为试验中所测得的试样不排水剪切强度~应变关系曲线。由图 9 可见阳极周围土体强度最大，两极中间次之，阴极最小，且土体抗剪强度随深度的增大而减小。方案 3 的加固效果比方案 2 显著，进一步说明电极布置形式对加固效果的

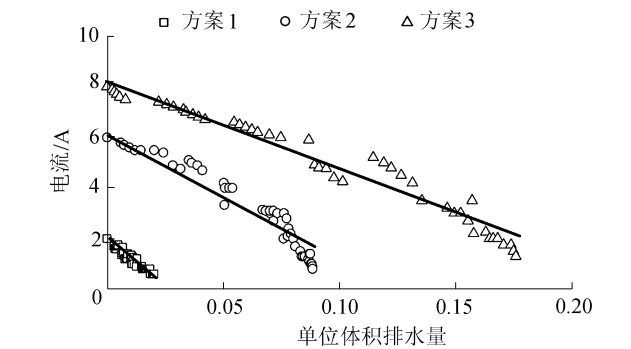


图 6 电流与单位体积排水量的关系

Fig. 6 Relationship between current and drainage discharge per unit volume

(3)

(4)

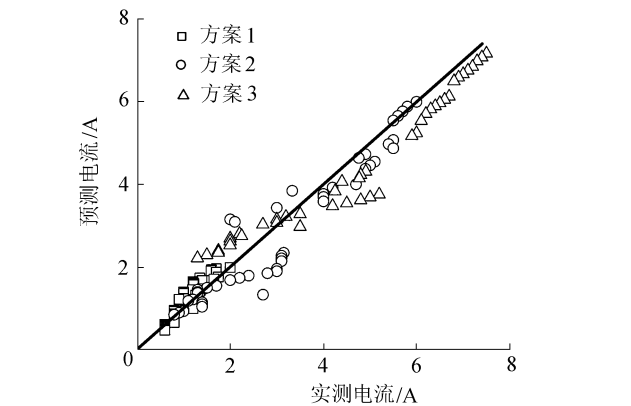


图 7 实测电流与预测电流对比

Fig. 7 Comparison of measured and predicted current

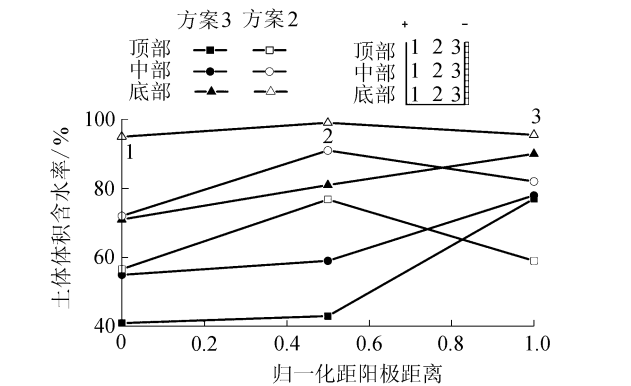


图 8 电渗结束后土体的体积含水率分布

Fig. 8 Distribution of water content after electroosmosis

的

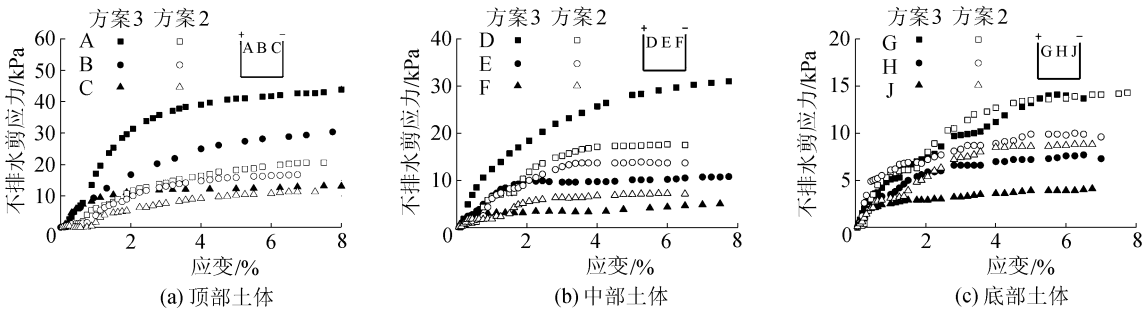


图9 电渗后土体不排水无侧限压缩试验结果

Fig. 9 Undrained and unconfined compression test for soils after electroosmosis

影响。通过对照不排水剪切强度和含水率的分布情况可知,电渗引起的土体强度增加主要归功于排水。试验结果还发现阳极周围土体强度提高较其他部位显著,这主要与阳极腐蚀引起的阳极附近 Fe^{2+} 和 Fe^{3+} 含量增加有关,由于铁离子和土体中的 OH^- 以及 CO_3^{2-} 发生化学反应形成具有较强黏聚力的胶结化合物,因此阳极周围土体的强度有较显著提高。

2.4 能量消耗

为评价电渗的工程经济效益,能量消耗是电渗研究中的重点。将3组试验的累积排水量与能量消耗之间的关系反映于图10,累计耗电量计算根据公式 $W = U \int_0^t I d\tau$ 计算。由图10可见,土体单位体积排水量与能量消耗之间基本呈线性关系,若将排水量换算为平均含水率,则可以根据处理后要求的土体含水率计算耗电量。

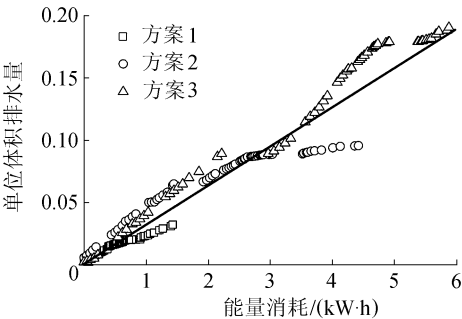


图10 单位体积排水量与能量消耗的关系

Fig. 10 Relationship between drainage discharge per unit volume and energy consumption

3 结 语

- a. 电渗法的排水与加固效果随电极布置形式变化,其效果随阳极数量的增多而变好,试验结果表明土体强度和含水率以1根阴极对应8根阳极的电极布置形式效果最佳。
- b. 通过试验结果分析可知电渗持续过程中电流随时间呈指数衰减形式;提出了电流的预测模型。
- c. 由于电渗时土体单位体积排水量与能量消耗呈线性关系,据此可大致计算土体处理到一定含水率时的耗电量。

参考文献:

[1] CASAGRANDE L. Electro-osmosis stabilization of soils[J]. Boston Soc Civ Eng, 1952, 39: 51-83.

[2] BJERRUM L, MOUM J, EIDE O. Application of electro-osmosis to a foundation problem in a Norwegian quick clay[J]. Geotechnique, 1967, 17: 214-235.

[3] FETZER C A. Electro-osmotic stabilization of West Branch Dam[J]. Journal of Soil Mechanic and Foundation Division, 1967, 93(4): 85-106.

[4] CHAPPELL B A, Burton P L. Electro-osmosis applied to unstable embankment[J]. Journal of Geotechnical Engineering Division, 1975, 101(8): 733-740.

[5] WADE M H. Slope stability by electro-osmosis[C]//CGS. Process of 29th Canadian Geotechnical Conference. Vancouver, Canada: British Columbia, 1976: 44-66.

[6] 王协群, 邹维列. 电渗排水法加固湖相软黏土的试验研究[J]. 武汉理工大学学报, 2007, 34(2): 95-99. (WANG Xiequn, ZOU Weilie. Experimental research on electro-osmotic consolidation of lacustrine clay[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2007, 34(2): 95-99. (in Chinese))

[7] MICIC S, SHANG J Q, LO K Y, et al. Electrokinetic strengthening of a marine sediment using intermittent current[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2001, 38: 287-302.

- [8] FABIEN B,GUY L,GILLES G. A case record of electroosmotic consolidation of soft clay with improved soil-electrode contact [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2004, 41: 1038-1053.
- [9] 胡俞晨,王钊,庄艳峰. 电动土工合成材料加固软土地基试验研究[J]. 岩土工程学报,2005,27(5): 582-586. (HU Yuchen, WANG Zhao, ZHUANG Yanfeng. Experimental studies on electro-osmotic consolidation of soft clay using EKG electrodes[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005,27(5): 582-586. (in Chinese))
- [10] RITTIRONG A, SHANG J Q, MOHANED E, et al. Effects of electrode configuration on electrokinetic stabilization for caisson anchors in calcareous sand[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2008, 3:352-365.
- [11] SHANG J Q. Electroosmosis-enhanced preloading consolidation via vertical drains[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1998, 35(3): 491-499.
- [12] 王柳江,刘斯宏,汪俊波,等. 真空预压联合电渗法处理高含水率软土模型试验[J]. 河海大学学报:自然科学版,2011,39(6): 671-675. (WANG Liujiang, LIU Sihong, WANG Junbo, et al. Model test for high-water-content soft soil treatment under vacuum preloading in combination with electroosmosis[J]. Journal of Hohai University:Natural Sciences,2011,39(6): 671-675. (in Chinese))
- [13] 汪俊波,刘斯宏,徐伟,等. 电渗法处理大连大窑湾超软土室内试验[J]. 水运工程, 2010, 437(1):15-19. (WANG Junbo, LIU Sihong, XU Wei, et al. Laboratory test for electro-osmotic treatment of ultra-soft soil in Dayao Bay, Dalian[J]. Port & Waterway Engineering, 2010, 437(1):15-19. (in Chinese))
- [14] 李瑛,龚晓南,张雪婵. 电压对一维电渗排水影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(3):769-714. (LI Ying, GONG Xiaonan, ZHANG Xuechan. Experimental research on effect of applied voltage on one-dimensional electroosmotic drainage[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(3):769-714. (in Chinese))
- [15] 储旭,刘斯宏,王柳江,等. 电渗法中含水率和电势梯度对土体电阻率的影响[J]. 河海大学学报:自然科学版,2010,38(5): 575-579. (CHU Xu, LIU Sihong, WANG Liujiang, et al. Influences of water content and potential gradient on electrical resistivity of soil in electro-osmosis method[J]. Journal of Hohai University:Natural Sciences,2010,38(5): 575-579. (in Chinese))
- [16] ZHUANG Yanfeng, WANG Zhao. Interface electric resistance of electroosmotic consolidation[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2007(12):1617-1621.
- [17] 徐伟,刘斯宏,王柳江,等. 真空预压联合电渗法加固软基的固结方程[J]. 河海大学学报:自然科学版,2011,39(2): 169-175. (XU Wei, LIU Sihong, WANG Liujiang, et al. Analytical theory of soft ground consolidation under vacuum preloading combined with electro-osmosis[J]. Journal of Hohai University:Natural Sciences,2011,39(2): 169-175. (in Chinese))
- [18] ESRIG M I. Pore pressure, consolidation, and electrokinetics [J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 1968, 94(4): 899-922.