

软黏土二维电渗固结性状的试验研究

李 瑛, 龚晓南, 焦 丹, 刘 振

(浙江大学 软土与环境工程教育部重点实验室, 浙江 杭州 310027)

摘要: 利用自制的试验装置, 进行轴对称条件下的饱和软黏土电渗固结试验, 通过测量电渗过程中的电势、电流和排出的水量以及电渗结束后土体的沉降量和含水率分布, 从电渗机制和能量消耗的角度研究土体的性状。结果表明: (1) 土体中的电势不仅与到阴极的距离有关, 而且与通电时间有关。轴对称条件下电势以折线形式分布, 折点在阴极附近。(2) 土体中的电场强度并不是不变的, 当忽略界面电阻的影响时, 它随电渗时间线性减小。(3) 在电渗的后期, 土体电阻率和能量消耗急剧增加, 并且存在突变点。试验证明, 可以通过能耗系数曲线来控制电渗时间, 减少能量消耗, 提高电渗效益。

关键词: 土力学; 电渗; 二维固结; 电势分布; 电场变化; 能量消耗

中图分类号: TU 442

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2009)增 2 - 4034 - 06

EXPERIMENTAL STUDY ON TWO-DIMENSIONAL ELECTRO-OSMOTIC CONSOLIDATION OF SOFT CLAY

LI Ying, GONG Xiaonan, JIAO Dan, LIU Zhen

(Key Laboratory of Soft Soil and Geoenvironmental Engineering, Ministry of Education, Zhejiang University,
Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

Abstract: A laboratory test program on electro-osmotic consolidation was conducted on saturated soft clay in the axisymmetric condition using an newly developed apparatus. Voltage, current, water discharge were observed during the test, and settlement and water content were measured after the test. Then consolidation characteristics of remolded soil were studied from the point of view of electro-osmotic mechanism and energy consumption on the basis of the measured data. The following conclusions are drawn. (1) Voltage at a certain point in the soil relies on both the distance to cathode and the working time. For axisymmetric model, electric potential is distributed in the form of a broken line, and the turning point is adjacent to cathode. (2) Electric field intensity in the soil is not constant but decreases with the working time when the interface resistance is not considered. (3) In the final stage of this test, soil resistance and the consumed energy may increase greatly close to a mutation point after a certain time. The test shows that the energy consumption curve can be used to control the electro-osmotic time and to reduce the energy consumption for a high efficiency of electro-osmosis.

Key words: soil mechanics; electro-osmosis; two-dimensional consolidation; electric potential distribution; electric field change; energy consumption

1 引 言

Casagrande 于 1939 年首次将电渗排水法成功运

用于铁路挖方工程。其后, 苏联、美国学者也相继对电渗技术进行了理论研究^[1, 2], 并尝试用于各种工程。20 世纪 50 年代末, 国内的同济大学、广东工学院等开始将电渗用于实际工程, 先后解决了宝

收稿日期: 2008 - 08 - 22; **修回日期:** 2008 - 11 - 20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50879076)

作者简介: 李 瑛(1985 -), 男, 2006 年毕业于西南交通大学土木工程学院水文地质与工程地质专业, 现为博士研究生, 主要从事地基处理与土力学方面的研究工作。E-mail: liying3104@163.com

山钢厂铁水包基坑开挖、上海真北立交基础施工等难题, 完成了海口市龙珠大厦地下室、珠江发电厂泵房和存渣池的开挖支护和软基加固的任务。汪闻韶等^[3-4]进行了电渗的理论研究和室内试验。近年来, Y. F. Zhuang 等^[5~8]从电极材料和界面电阻的角度研究了电渗固结, 而房营光等^[9-10]研究了电渗和真空预压的联合作用。

已有的研究表明, 在渗透系数小于 0.1 m/d 的以黏粒为主的流泥、淤泥或淤泥质土中, 电渗排水法能够克服常规重力排水方法效果差、速度慢的缺点^[11], 且由于是通过产生负压固结, 故不存在稳定问题。尽管优点明显, 但是由于存在作用机制不完善, 电极腐蚀严重、耗电量等问题, 电渗法并没有在工程中得到广泛应用, 目前只在珠三角和江浙一带^[12]有少量应用。

针对电渗法处理软基存在的问题, 本文利用自制的试验仪器进行了饱和软黏土在轴对称边界条件下的电渗固结试验, 得出了二维条件下的固结性状, 并从电势分布、能量消耗等角度对试验数据进行了分析和讨论。

2 试验准备

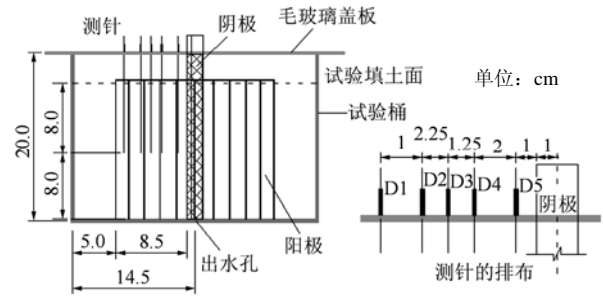
2.1 试验装置

插入土中的电极通上直流电后, 土体中除了电渗外, 还存在电解、电泳、电迁移等作用^[13]。但是在黏土中, 只有电渗对排水固结的作用是最主要的。D. Curvers 等^[14]的研究表明, 只要试验土样和电极合适, 其他作用的影响可以忽略不计。

黏土颗粒一般带负电, 土颗粒带正电, 在电场的作用下, 水分子从阳极向阴极移动。根据此原理, 并考虑实际工程情况, 笔者研制了室内电渗排水固结试验装置。整套试验装置如图 1(a)所示, 它由主体部分、电源和量测系统 3 部分组成。主体部分构造包括阴极、阳极、毛玻璃盖板和试验桶, 如图 1(b)所示。阴极是直径为 2 cm 的密钻小孔并捆绑铁丝网和包裹反滤土工布的有机玻璃管。而阳极是由 30 根竖向钢丝和圆环焊接而成的“笼子”, 如图 2 所示, 钢丝和圆环都是直径为 2 mm 的不锈钢丝。顶部的圆环只起连接竖向钢丝的作用, 不做电极, 试验时不埋入土中。装土样的试验桶的尺寸为: 内半径 14.5 cm, 高 20.0 cm, 壁厚 1.0 cm, 材料是有机玻璃。阴极、阳极和试验桶同轴布置。毛玻璃盖板上钻有小孔供电极、测针以及电线穿过。



(a) 整套试验装置



(b) 主体部分以及测针布置

图 1 试验装置图

Fig.1 Experimental apparatus

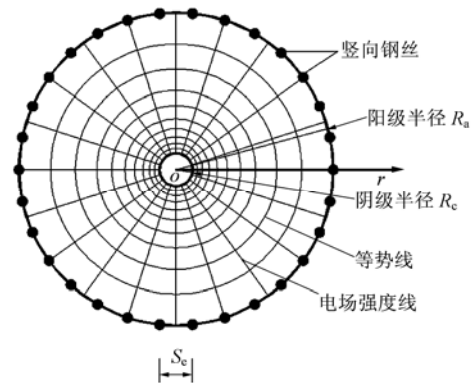


图 2 电极排布及土体初始电场

Fig.2 Electrode configuration and initial electric field of soil

试验采用的电源为固纬 SPD - 3606 稳压直流电源, 可提供最大 120 V 的输出电压或最大 6 A 的输出电流, 并且能够实时显示电路中的电流。量测系统包括测针、电压表、锥形烧瓶和量筒等。测针共有 5 根, 是直径 1 mm 的不锈钢, 入土 8 cm, 它们到阴极管中心的距离如图 1(b)所示。试验时, 电压表的负极与阴极管相联, 正极依次和每一个测针相连, 以测量电渗过程中每一个测点的电势。此外, 在试验桶桶底中心钻有小孔, 小孔和小孔下面放置的锥形烧瓶以导管相联, 以收集和测量试验排出的水。

2.2 试验方案

为了使系统简单并可重复，本试验选用重塑土作为试样。黏土取自杭州西溪，塑限为 22%，液限为 52%，塑性指数为 30。制作过程是将干粉加水调匀，密闭静置 24 h，以保证土样的均匀^[15]。试验开始时重塑土的含水率为 53.5%，密度为 1.63 g/cm³，相对密度为 2.75。

桶内土样高 16 cm，分 8 层填入，并击实以排出气泡；自重疏干 24 h 后，阴阳两极上施加 10 V 电压，试验开始，然后每隔 1 h 测量电流和电势分布，每隔 2 h 测量排出水的体积；当无水排出时，试验终止。断电后，分层分区域取样测定土体的含水率。为了消除外带离子对试验结果的影响，试验采用无离子水，并且所有相关的试验仪器都用无离子水进行了清洗。试验中各步骤都参照相关规程^[16]。

3 试验结果和讨论

3.1 电势分布和变化

本试验中电极和土样都是圆柱体，故可简化为二维问题。设阳极半径为 R_a ，阴极半径为 R_c ，阳极竖向钢丝的间距为 S_c ，建立如图 2 所示的坐标系。

A. Rittirong 等^[17]的研究表明，当 $S_c < R_a - R_c$ 时，阳极可以看成是一个连续的管。通电之前，土体可以认为是各向同性的。假设阴极管处的电场强度为 E_c ，半径 r 处的电场强度为 E_r ，根据电流连续性原理，有

$$E_r r = E_c R_c \quad (1)$$

根据电场强度的定义又有

$$E = \partial \phi / \partial r \quad (2)$$

式中： ϕ 为 r 处的电势。

联立式(1)和(2)，分离变量后积分得

$$\phi = E_c R_c (\ln r - \ln R_c) \quad (3)$$

代入边界条件 $R_c=1$ cm 和 $R_a=9.5$ cm，阳极电势 ϕ_a 取 10 V，可求得 $E_c R_c=4.442$ V，则输出电压为 10 V 时，土体中任一点的电势为

$$\phi = 4.442 \ln r \quad (4)$$

由式(4)可知，电渗刚开始时电极间电势分布在半对数坐标上为一条直线，如图 3 所示，这也是 Esrig 理论中所假设的电势分布。

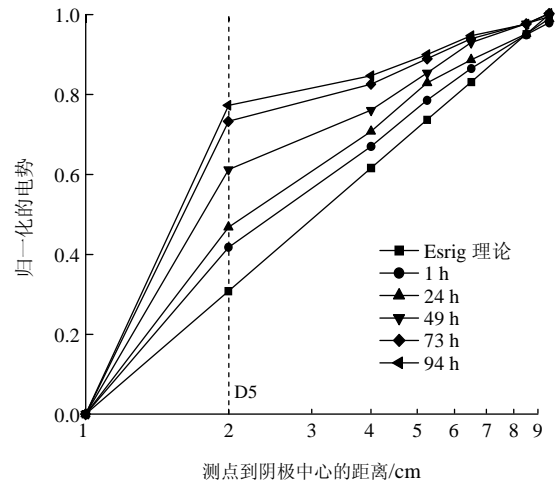


图 3 两极间电势分布和变化

Fig.3 Distribution and variation of electric potential between two electrodes

从图 3 还可以得出，试验刚开始时，土体只有少量的水排出，各处电阻率基本相等，电势分布基本上是线性的；然后随着土体中的水不断地从阳极流到阴极排出，土体的电势分布呈折线形式，并且曲线转折点 D5 处(实际的转折点在点 D5 到阴极管之间)的电势越来越大，这不但证实土体和阴极的接触面上存在较大的界面电阻^[5]，而且说明采用合适的电极形式可以减小乃至消除界面电阻。而界面电阻随时间不断增大，可能与阴极管不断积累的白色沉淀物有关。由于界面电阻只存在于与阴极接触的小部分土体中，故可将研究的重点放在电势呈线性分布的点 D5 到阳极范围的土体。同时为了表述二维条件下土体电场的大小和变化，引入等效电场强度 J ：

$$J = \frac{\phi_a - \phi_1}{\ln R_a - \ln r_1} = 0.642(\phi_a - \phi_1) \quad (5)$$

式中： r_1 为点 D5 到坐标原点的距离， ϕ_1 为点 D5 处的电势。图 4 是根据式(5)计算出来的等效电场强度随通电时间 t 变化的曲线，它们大致成线性关系：

$$J = 3.70 - 0.026t \quad (6)$$

由于点 D5 到阳极范围内土体的电势以线性分布，故式(5)中的 ϕ_1 ， r_1 可以用其间任一点的电势和半径 ϕ_r ， r 来代替，即

$$J = \frac{\phi_a - \phi}{\ln R_a - \ln r} \quad (7)$$

联立式(6)和(7)，并考虑到 $R_a=9.5$ cm， $\phi_a=10$ V，可得

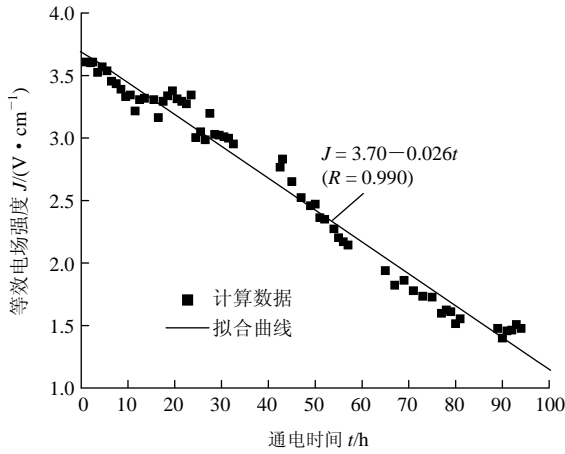


图 4 等效电场强度随通电时间变化曲线

Fig.4 Variation of equivalent electric field intensity with working time

$$\phi = 3.70 \ln r + 0.06t - 0.026t \ln r + 1.675 \quad (8)$$

式(8)说明, 在轴对称的二维条件下, 即使不考虑界面电阻的影响, 电极间的电势仍然不是 Esrig 经典理论里面所假设的线性分布且不随时间变化。

3.2 电流及排水量

为了研究电渗的效率, 本文引入能耗系数 C , 它表示在电渗后期每排出 1 mL 水所要消耗的电能, 计算公式如下:

$$C = \frac{\int_0^{94} UI_t dt - \int_0^t UI_t dt}{V_{94} - V_t} \quad (9)$$

式中: I_t , V_t 分别为 t 时土体中的电流和累积排出的水量; U 为电源的输出电压, 为 10 V; V_{94} 为排出的总水量。

图 5 是用式(9)计算出来的电渗能耗系数和通电时间的关系曲线。从图 5 可知, 通电 65 h 后, 能耗系数突然增大, 继续通电就变得不经济了。此时, 电渗已经排出总水量 717 mL 的 95.8%, 消耗的能量占总能量的 73.4%。这意味着在接下来的 29 h 里, 电渗要以总能量的 26.6% 去排出总水量的 4.2%。

此规律同样显示在土体电阻和含水率的关系曲线上, 见图 6。当土体的含水率低于突变点的含水率 46.84%, 电渗的无效电流比例增大, 电渗变得不经济, 而 46.84% 所对应的电渗通电时间又恰好是 65 h。图中土体的电阻 R_t 和含水率 w_t 都是平均值, 可分别利用下式计算得到

$$R_t = \frac{U}{I_t} \quad (10)$$

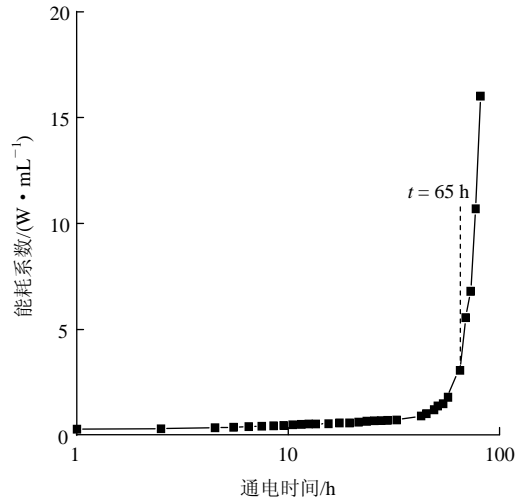


图 5 能耗系数和通电时间的关系

Fig.5 Relation between energy consumption coefficient and working time

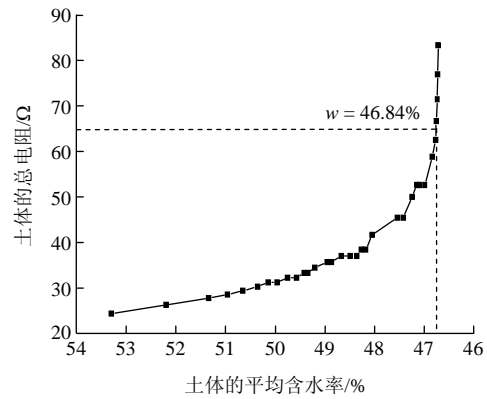


图 6 土体的总电阻与平均含水率的关系

Fig.6 Relation between total resistance and average water content

$$w_t = w_0 - \frac{V_t(1 + w_0)}{V\rho_0} \quad (11)$$

式中: w_0 为土体的初始含水率, 为 53.5%; ρ_0 为土体的初始密度, 为 1.63 g/cm³; V 为土体的体积, 假设在电渗过程中不变。

上述试验结果表明, 可以通过控制通电时间来达到减少电渗能耗的目的。

3.3 试验结束时的含水率分布

图 7 是试验后土体的含水率分布情况。从图中可以看出, 从阳极到阴极含水率逐渐增大, 这与曾国熙等^[4, 6]的试验结果一致。底部 4 号取样点含水率的异常是由于阴极管底部约 1 cm 的长度和底板嵌固而没有透水小孔。电渗前后底部 1 号处的含水率基本没有变化, 这碰巧给出了电渗作用的范围。阳极附近土体的含水率最低, 故最先开裂, 这点在

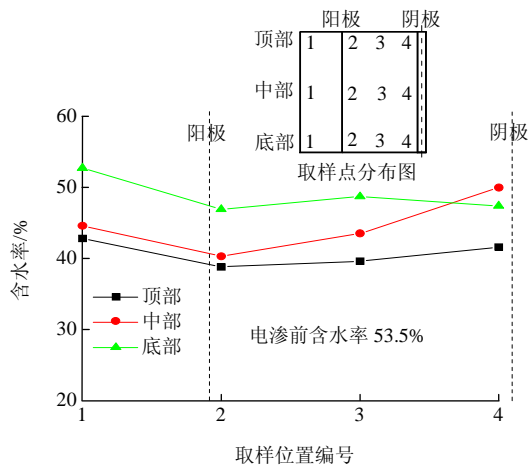


图7 试验结束后土体的含水率分布

Fig.7 Distribution of water content after electro-osmosis

试验现象记录和试验结束后裂缝的分布中得到了证实, 如图 8(a)所示。



(a) 裂缝



(b) 阴极管

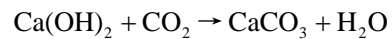
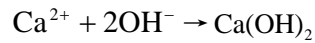
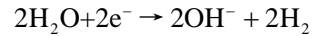
图8 试验结束后的裂缝和阴极管

Fig.8 Cracks and cathode pipe after tests

3.4 观测到的其他性状

试验结束后, 电势测针和阳极的表面略有腐蚀, 说明在本试验中确有电化学反应, 但是量很小。在电渗的后期, 接水瓶中会有白色的沉淀物, 同时试验后阴极管外包的土工布上也有白色物质, 如图 8(b)所示。简单的分析和化学鉴别发现它们是同一物质, 即电化学反应生成的 CaCO_3 。反应过程可能为

土中的 Ca^{2+} 和电解水生成的 OH^- 反应得到 Ca(OH)_2 , Ca(OH)_2 与空气中的 CO_2 结合生成 CaCO_3 , 其化学方程式如下:



此外, 在试验结束时测得土体的总沉降量为 1 cm, 裂缝的最大深度为 3 cm。以上说明本文采用的一些设想是合理的。

3.5 对试验尺寸的讨论

本试验采用轴对称布置, 阴极居中, 阳极在外围。阴极兼具排水通道的作用。鉴于此种布置方式与砂井相同, 阳极半径和阴极半径之比 n 也定义为井径比。D. H. Shield 和 P. W. Rowe^[18]在一系列的试验后推荐采用 $n > 20$ 的试样, 以减少土样和砂井之间的压缩性差异。但是试样越大, 所需要的固结时间也越长。因此一般室内试验倾向于小尺寸试样。

目前工程实践采用的电极排布方式主要有矩形布置和正六边形布置两种。经过面积等效, 它们可以转换成轴对称布置。转换后的阳极半径在 46 cm 左右, 阴极半径在 2 cm 左右, 即井径比 $n = 23$ 。

综合以上因素, 本文选用 $n = R_a / R_c = 14.5$ 。由于本试验主要研究电渗固结的机制, 并且进一步的研究会有现场试验, 所以尽管这个比值只比实际的一半略大, 但得出的结论仍然是合理的。

4 结 论

本文利用自制的试验装置, 进行了轴对称条件下的饱和软黏土电渗固结试验, 并得出以下结论:

(1) 土体中的电势不仅与到阴极的距离有关, 而且与通电时间有关。轴对称条件下电势以折线形式分布, 转折点在阴极附近。传统的电渗理论忽略了土体和阴极接触面上界面电阻的影响, 采用的电势梯度偏大。

(2) 土体中的电场强度并不是不变的, 忽略界面电阻的影响, 它随电渗时间线性减小。

(3) 在电渗的后期, 土体电阻率和能量消耗急剧增加, 并且存在突变点。突变点后, 用 26.6% 的能量却只能排除 4.2% 的水, 电渗变得不经济。因此可以通过能耗系数曲线来控制电渗时间, 减少能量消耗, 提高电渗效益。

土体的电渗是多场耦合的复杂问题, 本文只是

从最基础的角度来研究问题, 在试验中没有研究电极材料、电极布置形式对排水固结的影响。同时为了研究的简便, 本文没有进行 pH 值和孔隙水压力的测量。进一步的研究可以考虑以上因素来进行。

参考文献(References):

- [1] ESRIG M I. Pore pressures, consolidation and electro-osmosis[J]. *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE*, 1968, 94(4): 899 - 921.
- [2] WAN T Y, MITCHELL J K. Electro-osmotic consolidation of soil[J]. *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 1976, 102(5): 473 - 491.
- [3] 汪闻韶. 土力学中电渗问题综合报告[C]//《汪闻韶院士土工问题论文选集》编委会. 汪闻韶院士土工问题论文选集[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999: 1 - 6.(WANG Wenshao. About the problem of electro-osmosis in soil mechanics[C]// The Committee of the Selected Works on Geotechnical Engineering of Academician WANG Wenshao. Select works on geotechnical engineering of academician WANG Wenshao[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1999: 1 - 6.(in Chinese))
- [4] 曾国熙, 高有潮. 软黏土的电化学加固[J]. *浙江大学学报*, 1956, (8): 12 - 35.(ZENG Guoxi, GAO Youchao. Electrochemical hardening of soft clay[J]. *Journal of Zhejiang University*, 1956, (8): 12 - 35.(in Chinese))
- [5] ZHUANG Y F, WANG Z. Interface electric resistance of electro-osmotic consolidation[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2007, 133(12): 1 617 - 1 621.
- [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, 29(2): 95 - 99.(WANG Xiequn, ZOU Weilie. Experimental research on electro-osmotic consolidation of lacustrine clay[J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2007, 29(2): 95 - 99.(in Chinese))
- [7] 邹维列, 杨金鑫, 王 钊. 电动土工合成材料用于固结和加筋设计[J]. *岩土工程学报*, 2002, 24(3): 319 - 322.(ZOU Weilie, YANG Jinxin, WANG Zhao. Design methods of electro-kinetic geosynthetics for consolidation and soil reinforcement[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2002, 24(3): 319 - 322.(in Chinese))
- [8] 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))
- [9] 房莹光, 徐 敏, 朱忠伟. 碱渣土的真空 - 电渗联合排水固结特性试验研究[J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2006, 34(11): 70 - 75.(FANG Yingguang, XU Min, ZHU Zhongwei. Experimental investigation into draining consolidation behavior of soda residue soil under vacuum preloading-electro-osmosis[J]. *Journal of South China University of Technology(Natural Science)*, 2006, 34(11): 70 - 75.(in Chinese))
- [10] 高志义, 张美燕, 张 健. 真空预压联合电渗法室内模型试验研究[J]. *中国港湾建设*, 2000, (5): 58 - 61.(GAO Zhiyi, ZHANG Meiyuan, ZHANG Jian. Laboratory model test of vacuum preload in combination with electro-osmotic consolidation[J]. *China Harbour Engineering*, 2000, (5): 58 - 61.(in Chinese))
- [11] 崔红军, 吕小林, 王孝明. 湖积软土地基的处理方法[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(17): 2 998 - 3 002.(CUI Hongjun, LU Xiaolin, WANG Xiaoming. Reinforcement method of lacustrine soft soil foundation[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(17): 2 998 - 3 002.(in Chinese))
- [12] 罗炳生, 黄安仁. 珠江三角洲电渗固结的理论与实践[M]. 北京: 海洋出版社, 1992.(LUO Bingsheng, HUANG Anren. Theory and practice of electro-osmotic consolidation in Zhujiang Delta[M]. Beijing: China Ocean Press, 1992.(in Chinese))
- [13] REDDY K R, URBANEK A, KHODADOUST A P. Electroosmotic dewatering of dredged sediments: bench-scale investigation[J]. *Journal of Environmental Management*, 2006, 78(2): 200 - 208.
- [14] CURVERS D, MAES K C, SAVEYN H, et al. Modelling the electro-osmotically enhanced pressure dewatering of activated sludge[J]. *Chemical Engineering Science*, 2007, 62(8): 2 267 - 2 276.
- [15] 李又云, 刘保健, 谢永利. 软土结构性对渗透及固结沉降的影响[J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25(增 2): 3 587 - 3 592.(LI Youyun, LIU Baojian, XIE Yongli. Influences of permeability and consolidation settlement on structure of soft clay[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(Supp.2): 3 587 - 3 592.(in Chinese))
- [16] 中华人民共和国行业标准编写组. SL237 - 1999 土工试验规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.(The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. SL237 - 1999 Specifications of soil test[S]. Beijing: China Water Power Press, 1999.(in Chinese))
- [17] RITTIRONG A, SHANG J Q, MOHAMEDHASSAN E, et al. Effects of electrode configuration on electrokinetic stabilization for caisson anchors in calcareous sand[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2008, 134(3): 352 - 365.
- [18] SHIELDS D H, ROWE P W. Radial drainage oedometer for laminated clays[J]. *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE*, 1965, 91(1): 15 - 24.