

DOI: 10.11779/CJGE201807011

化学电渗法加固软黏土地基对比室内试验研究

任连伟¹, 肖扬¹, 孔纲强², 张敏霞¹

(1. 河南理工大学土木工程学院, 河南 焦作 454000; 2. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098)

摘要: 基于室内试验方法, 开展了阳离子摩尔量、 CaCl_2 和 Na_2SiO_3 化学作用等因素对软黏土电渗排水及加固效果的影响规律研究; 实测了化学溶液联合电渗试验中排水量与排水速率、土体导电性、能耗以及试验结束后土样含水率、抗剪强度的分布规律, 并开展了常规电渗试验作为对比分析。研究结果表明, 增加土样中阳离子摩尔量, 是增加电渗排水量、提高排水速率及缩短电渗时长的有效方法之一; 与常规电渗试验相比, 联合注入 CaCl_2 和 Na_2SiO_3 溶液的土体平均抗剪强度提高了约 120%, 较单独加入 Na_2SiO_3 或 CaCl_2 溶液多提高约 20%; 联合注入 CaCl_2 和 Na_2SiO_3 溶液对改善电渗处理后土体含水率和抗剪强度分布不均问题作用明显。

关键词: 地基处理; 软黏土; 化学电渗法; 室内试验

中图分类号: TU472 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2018)07-1247-10

作者简介: 任连伟 (1980-), 男, 河南周口人, 博士, 副教授, 主要从事地基处理新技术与新桩型研发方面的教学与科研工作。E-mail: renhpu@163.com。

Laboratory tests on soft ground improvement by chemical electro-osmosis method

REN Lian-wei¹, XIAO Yang¹, KONG Gang-qiang², ZHANG Min-xia¹

(1. School of Civil Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China; 2. Key Laboratory of Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Ministry of Education, Nanjing 210098, China)

Abstract: Based on the laboratory test method, the improvement effects of soft ground influenced by molar amount of cation, chemical action of CaCl_2 and Na_2SiO_3 are investigated. The distributions of drainage rate, soil conductivity, energy consumption, soil water content and shear strength after different tests are analyzed comparatively. For comparative analysis, the laboratory tests on soft ground improvement by the traditional electro-osmotic method are also carried out. The test results show that the increasing molar amount of cations in soft clay is one of the most effective methods to increase the drainage amount, to improve the drainage rate and to shorten the electro-osmotic duration. The average shear strength of soil treated by the combined injection of CaCl_2 and Na_2SiO_3 is increased by about 120%, and nearly 20% higher than that of injection of CaCl_2 or Na_2SiO_3 lonely. The combined method of CaCl_2 and Na_2SiO_3 has significant effect on improving the uniform distribution of water content and shear strength of soft clay after chemical electroosmotic treatment.

Key words: ground improvement; soft clay; chemical electro-osmosis method; laboratory test

0 引言

电渗法是利用电能促使土体排水固结的地基处理方法, 电渗法针对低强度、高含水率、低渗透性的软黏土具有良好的加固效果, 因此该方法被用于淤泥质软土地基处理、吹填土加固以及尾矿处理等领域。电渗法最早由俄国学者 Reuss 提出, 国内外学者对其进行了大量的试验研究和理论分析。在理论分析方面, Esrig^[1]创造性地建立了电渗一维固结理论; Shang^[2]以土体水力传导系数各向同性假设为基础, 推导出电极平面内的二维固结理论; 庄艳峰等^[3]观测到电渗过程中的电荷积累现象, 并提出了电渗的电荷累积理论。在优化试验技术方面, Chien 等^[4]对比了不同交流电整

流输出方式对电渗结果的影响, 提出半波整流输出方案, 为电源输出方式提供了新思路; 刘飞禹等^[5]、李瑛等^[6]讨论了电压加载方式和输出值对电渗效率的影响; Lo 等^[7]提出采用电极反转使得电极间土体强度的提高相对均一; 李一雯等^[8]、Jones 等^[9-10]分析了电极布置形式的差异性对电渗的处理效果的影响规律; Feng 等^[11]、陶燕丽等^[12]对比了不同电极材质在电渗试验中的表现, 发现传统的金属电极存在腐蚀和钝化问题; 胡俞晨等^[13]、邹维列等^[14]尝试采用电动土工合成

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51478165, 51508166)

收稿日期: 2017-01-20

材料代替传统金属电极，并介绍了相关设计方法，促进了电渗法在软土地基处理工法中的推广。部分学者从降低电渗能耗的角度出发，展开了传统地基处理方法和电渗法的联合作用研究，孙召花等^[15]尝试进行了真空预压与电渗异步加固的试验研究，证明了联合作用的优越性；王柳江等^[16]进行了堆载联合电渗法的理论研究；符洪涛等^[17]提出了强夯联合电渗的综合加固方法。

与此同时，部分学者研究了注入盐溶液对电渗处理的影响，李瑛等^[18]研究了土体含盐量对电渗排水的影响，指出含盐量对软黏土电渗性状影响明显，且存在最佳含盐量值。Chien等^[19]在电渗试验中分别注入KCl、NaCl和CaCl₂溶液，通过对比发现，增加阳离子化学价和浓度能降低界面电动势。Chen等^[20]对比了在土体不同位置处注射化学试剂对电渗处理后土体加固效果的影响，指出在阳极和土体中部同时注入效果最好。Burnotte等^[21]在阳极注入化学溶液，降低了土-电极接触面的电势损失。Asavadorndeja等^[22]通过改变阳极酸碱环境来提高电渗效果。Shang等^[23]探讨了海相石灰土电渗试验中不同浓度的CaCl₂和Al₂(SO₄)₃·18H₂O溶液对土样抗剪强度的影响，并指出注入15%浓度的CaCl₂溶液对电渗处理后土样抗剪强度提高值最大。Ou等^[24]研究发现化学溶液的注入能显著提升电渗后土体的抗剪强度，缩短电渗处理时间。Alshawabkeh等^[25]详细分析了电渗过程中电极附近酸碱环境变化对电渗效果的影响。Reddy等^[26]提出添加低浓度的高分子聚合物可增强电渗效果。

化学溶液之间的化学反应，可以提高电渗处理效果，电渗作用可以扩大化学作用的影响范围；然而，以往的试验研究主要以化学溶液的持续注射时长为主控因素，对电渗过程中随着饱和软黏土的含水率降低、盐溶液浸入土体的速率变化、以及盐溶液的注入量等相关研究相对较少。因此，本文针对该问题系统研究了阳离子摩尔量对电渗效果的影响，及电渗过程中CaCl₂和Na₂SiO₃的胶结作用与电渗作用的相互影响。

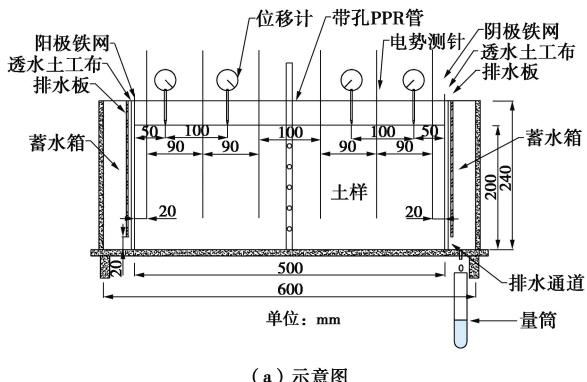
1 模型试验概况

1.1 试验装置

模型试验装置示意图与实物图如图1(a)、(b)所示，模型试验槽由试样槽、蓄水槽、电极、排水板、土工布及量筒等部分组成。整体外形尺寸为60 cm×15 cm×24 cm，两侧蓄水箱尺寸为5 cm×15 cm×24 cm，中间为试样槽。通过蓄水箱对土体和排出的水进行空间分隔。土样装填高度为20 cm，蓄水槽底部设置直径为1 cm的排水孔。土样中间部位插值

直径为1 cm的带孔PPR管，管外包裹透水土工布，电渗过程中从PPR管注入化学溶液。电极（阳极和阴极）采用尺寸为15 cm×15 cm的板状铁网材料，网眼尺寸为2 mm×2 mm。电极外侧布置矩形排水板，排水板宽为15 cm，高为22 cm，排水板距试验槽底部预留2 cm高的间距作为排水通道。电极和排水板之间铺设透水土工布作为反滤层，防止黏土颗粒堵塞排水通道。电渗过程中，土样中的水从阳极水平流动至阴极，之后透过土工布经排水板导流向下流动并通过排水通道汇聚在阴极蓄水槽内，汇聚在蓄水槽内的水通过底部的排水孔流到量筒。试验过程中通过称量筒质量变化来测量电渗排水量。电源采用DP800系列线性直流电源，可显示实时的电压、电流和功率值。

试验测试元器件包括电势测针、位移计等。电势测针采用6根直径为1 mm、长度为30 cm的不锈钢丝，待土样装填完成后，将测针竖直插入土样深度15 cm处，测针的布置间距如图1(a)所示。土样表面布置位移计测量电渗过程中土体沉降，位移计探针下部设2 cm×5 cm塑料沉降板。



(a) 示意图



(b) 实物图

图1 模型试验装置

Fig. 1 Model test devices

1.2 试验土样

试验土样选取郑州市某工程现场采集的原状黏性土，为了避免原状土中砂砾、碎石等杂质对试验结果的影响，对原状土进行重塑。室内将原状土烘干、碾碎、过筛，按液限1.5倍含水率加蒸馏水后搅拌均匀，

然后将重塑的土样密封静置 24 h 使土样充分饱和。试验前测试土样基本物理性质, 具体如表 1 所示。

表 1 试验土样的基本物理指标

Table 1 Physical parameters of test soil

w /%	G_s	e	S_f /%	w_L /%	w_p /%	k ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)
55.5	2.74	1.57	96.9	37.4	18.2	1.62×10^{-6}

2 模型试验工况与方案

试验分 6 组进行, 其中试验编号 D 表示在电渗过程中注入 100 mL 蒸馏水; 试验编号 $C_{0.5}$ 、 $C_{1.0}$ 、 $C_{1.5}$ 表示在电渗过程中分别注入 100 mL 浓度分别为 0.5, 1.0, 1.5 mol/L 的 CaCl_2 溶液; 试验编号 $N_{1.0}$ 表示在电渗过程中注入 100 mL 浓度为 1.0 mol/L 的 Na_2SiO_3 溶液; 试验编号 L 表示在电渗过程中先后注入 50 mL 浓度为 1.0 mol/L 的 CaCl_2 溶液和 50 mL 浓度为 1.0 mol/L 的 Na_2SiO_3 溶液, 各组试验注入化学溶液的种类及体积见表 2 所示。

表 2 试验工况

Table 2 Summary of test conditions

试验 编号	溶液浓度/($\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$)		溶液体积/mL		
	CaCl_2	Na_2SiO_3	CaCl_2	Na_2SiO_3	H_2O
D	—	—	—	—	100
$C_{0.5}$	0.5	—	100	—	—
$C_{1.0}$	1.0	—	100	—	—
$C_{1.5}$	1.5	—	100	—	—
$N_{1.0}$	—	1.0	—	100	—
L	1.0	1.0	50	50	—

试验步骤为: ①首先将电极、土工布、排水板润湿后按图 1(a) 所示位置放入试验槽。②然后分层装填土样至高度 20 cm, 均匀密实, 其初始密度为 1.66 g/cm^3 , 并在土样表面覆盖塑料膜用于防止水分蒸发。③之后按照图 1(a) 所示布置电势测针、位移计和 PPR 管, 将空量筒重后放置于排水孔正下方。④装配完毕后, 调节电源输出恒定电压 50 V, 接通电路, 从 PPR 管注入配制好的化学溶液。其中 L 试验先注入 CaCl_2 溶液, 待其在电场作用下完全浸入土体后, 再注入 Na_2SiO_3 溶液。各组试验每隔 2 h 称量筒重量求出排水量, 读取电流值和土样沉降位移, 用万用表测量各电势测针之间的电势强度。当排水速率降至 5 mL/h 时, 判定为电渗停止排水, 断开电源, 停止试验。试验结束后, 按图 2 所示测点位置分别取样测试含水率, 之后用便携式十字剪切板测量测点处的抗剪强度值。

3 模型试验结果与分析

3.1 排水量和排水速率

不同 Ca^{2+} 浓度对电渗排水效果的影响规律如图 3

所示。由于各组试验化学溶液注入量一致, 且溶液体积均远小于电渗排水总量, 故忽略注入的化学溶液体积对电渗排水量的影响。由图 3 可见, 电渗排水量和 Ca^{2+} 浓度呈正相关性。与试验 $C_{0.5}$ 相比, 试验 $C_{1.0}$ 排水量增加了 57.29%, 电渗处理时长增加了 43.5%; 试验 $C_{1.5}$ 排水量增加 57.58%, 电渗处理时长增加了 8.7%。说明电渗过程中增加 Ca^{2+} 浓度可增加电渗排水量。

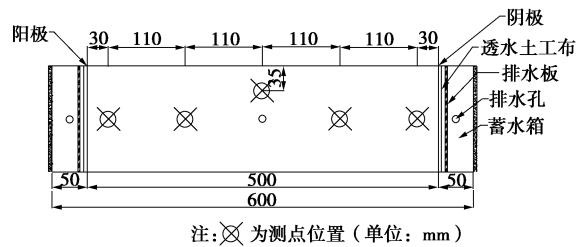


图 2 测点布置平面位置示意图

Fig. 2 Plan of measuring points in model tank

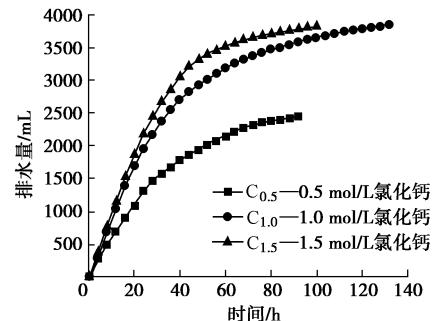


图 3 不同 Ca^{2+} 浓度条件下电渗排水量随时间变化曲线

Fig. 3 Curves of drainage-time under different Ca^{2+} Molar amounts

不同 Ca^{2+} 浓度条件下电渗排水速率随时间的变化曲线如图 4 所示。由图 4 可见, 排水速率呈非线性衰减趋势, 并最终趋于一个稳定值。在试验初期, Ca^{2+} 离子浓度越高, 电渗排水越快, 排水速率降低现象也越明显。与试验 $C_{0.5}$ 相比, $C_{1.0}$ 的平均排水速率提高了 9.7%, $C_{1.5}$ 提高了 44.0%, 说明增加 Ca^{2+} 浓度可提高电渗排水效率, 缩短电渗处理时长。

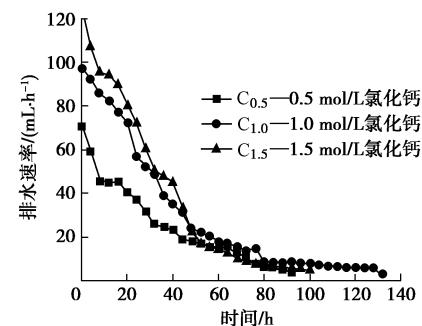


图 4 不同 Ca^{2+} 浓度条件下电渗排水速率随时间变化曲线

Fig. 4 Curves of drainage rate-time under different Ca^{2+} Molar amounts

水属于极性分子,电渗过程中阳离子携带水分子在电场作用下汇集到阴极形成排水,水化阳离子迁移量代表了电渗作用的强度。 CaCl_2 浓度越高,土样中的阳离子越多,电渗作用也就越强。 CaCl_2 溶液的注入改变了土体中自由溶液的离子浓度,促进了离子交换作用。

试验C_{1.5}注入 CaCl_2 浓度最大,所以其土样自由溶液中的 Ca^{2+} 浓度相对最多,基于Gapon交换平衡原理,其 Ca^{2+} 离子交换能力最强。交换离子的类型和浓度直接影响了土的性状, Ca^{2+} 离子交换量越大,双电层厚度越薄,土样渗透性系数越大,排水条件最优越。土样的电渗作用强度和排水条件共同影响着电渗的排水速率,增大土体中 Ca^{2+} 浓度,有利于增大电渗排水量,提高排水速率。

电渗过程中注入等体积的不同化学溶液对电渗排水效果的影响规律如图5所示。由图5可得,L试验先注入体积为50 mL、浓度为1.0 mol/L的 CaCl_2 溶液,电渗持续至44 h后 CaCl_2 溶液透过PPR管完全浸入土体,此时累计排水量为2207.3 mL。相同时间条件下,C_{1.0}累计排水量为2919.4 mL,两组试验注入的 CaCl_2 溶液浓度相同,但体积相差1倍, Ca^{2+} 浓度也相差1倍,证明增加 Ca^{2+} 浓度可提高电渗排水量。

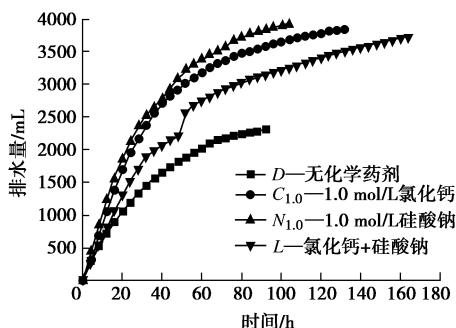
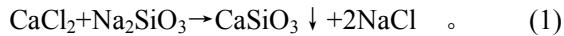


图5 不同化学试剂条件下电渗排水量随时间变化曲线

Fig. 5 Curves of drainage-time under different tests

试验L排水效果弱于N_{1.0}和C_{1.0},浸入土样的 CaCl_2 溶液和 Na_2SiO_3 溶液发生如下胶凝反应:



反应生成的 CaSiO_3 沉淀堵塞土粒间的空隙,降低了土样的渗透性,同时,减少了土样中可自由移动的水化 Ca^{2+} 离子数量。由于电渗排水实际上是水分子随着水化阳离子在电场作用下的移动,水化阳离子的减少影响了试验L的排水量。说明增加土样中的阳离子量可促进电渗排水,但化学胶凝反应不利于电渗排水量的提高。

电渗过程中排水速率随时间的变化曲线如图6所示。N_{1.0}阳离子量最大,排水速率最快,但其排水速

率降低趋势也最明显。黏土颗粒具有胶体性质,可选择性吸附和自身晶格中成分相近的离子。黏土矿物中的硅氧四面体晶胞吸附了与其相近的 SiO_3^{2-} 离子,黏土颗粒表面形成负电荷。为了维持电荷平衡,溶液中的 Na^+ 离子在静电引力作用下被吸附至黏土颗粒表面,双电层中低价 Na^+ 阳离子增多,土粒的扩散层变厚,土粒表面吸附水层变厚,土样透水性减弱,排水速率降低。

由图6可见,L试验注入 Na_2SiO_3 后,电渗排水速率发生突增,说明注入的 Na^+ 离子对提高排水率发挥了作用。但 SiO_3^{2-} 离子和扩散到土样中的 Ca^{2+} 离子快速发生胶凝反应,损耗了水化阳离子量,排水速率又迅速降低至注入 Na_2SiO_3 之前水平。试验结束后,PPR管附近土样中发现白色沉淀物,证明胶凝反应在溶液注入位置处反应激烈,这在一定程度上影响了 Ca^{2+} 在土体内的扩散。试验L排水最慢,说明化学胶凝作用对电渗排水速率影响较大。

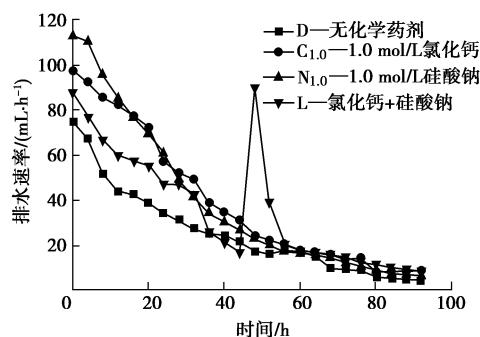


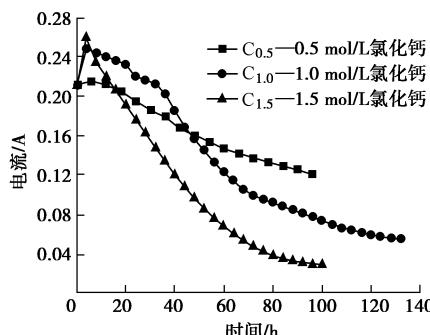
图6 不同化学试剂条件下电渗排水速率随时间变化曲线

Fig. 6 Curves of drainage rate-time under different tests

3.2 电流和电阻

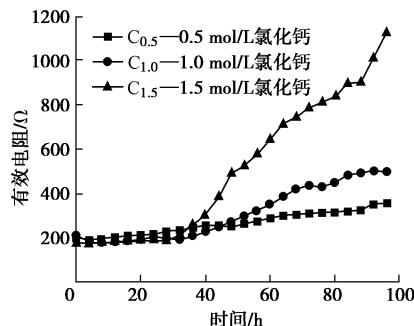
电渗过程中电流随时间的变化过程如图7所示。接通电源时,3组试验初始电流均为0.21 A,由于 CaCl_2 溶液的注入增加了土样的导电性,开始通电0~4 h内电流逐渐增大,C_{0.5}、C_{1.0}、C_{1.5}试验电流分别增大至0.22,0.25,0.26 A,说明通过增加 Ca^{2+} 浓度来提高土体导电性在电渗初始阶段有效。4 h之后电流开始降低,其中试验C_{1.5}的电流在18 h后低于C_{0.5},试验C_{1.0}的电流在48 h后低于C_{0.5}。C_{1.5}试验电流降低速度最快、C_{0.5}最慢。

联合图4,7可知,排水速率和电流衰减速度正相关,说明水的排出引起土样导电性降低。排水基本停止时,C_{0.5}、C_{1.0}、C_{1.5}试验电流分别降至0.12,0.05,0.03 A,而图4显示此时3组试验的排水速率都维持在4.0 mL/h左右。说明电渗排水主要依靠阳离子吸附极性水分子在电场作用下向阴极汇聚,单纯提高电流强度对于提高电渗排水速率未必有效。

图7 不同 Ca^{2+} 离子量条件下电流随时间变化曲线Fig. 7 Curves of current-time under different Ca^{2+} Molar amounts

结合本试验实际情况,假定距阴阳两级2 cm处电势测针间的电势差为有效电势,有效电阻为有效电势和电流强度的比值。不同 Ca^{2+} 浓度条件下有效电阻随时间的变化曲线如图8所示。由图8可见,试验C_{0.5}有效电阻随时间基本呈线性增长,C_{1.0}和C_{1.5}在28 h前有效电阻基本不变,且均低于C_{0.5},说明 Ca^{2+} 浓度的增加提高了土样的导电性。随着土样持续排水,同时由于 Ca^{2+} 和电解产生的 OH^- 与土体中 SiO_2 发生反应生成水化硅酸钙(CSH)难容物,土样的电阻逐渐增大。 Ca^{2+} 离子量越大,有效电阻增大越明显。

综合图7,8中C_{1.5}和C_{0.5}电流和有效电阻的变化可知,在20~38 h试验C_{1.5}的有效电阻和电流均小于C_{0.5},即C_{1.5}的有效电势小于C_{0.5}。这是因为C_{1.5}试验前期排水速率过快,阳极附近土样的水分快速汇集到阴极,阳极附近的土样发生体缩,阳极和土样接触面减小,界面电阻增大,而用于土样排水的有效电势降低。试验过程中通过电势的监测发现,阳极和其邻近电势测针间的电势差不断增大,说明试验C_{1.5}电流低于C_{0.5}并非完全因为有效电阻的增大, Ca^{2+} 离子量越大,阳极界面电阻占用的能耗越多。

图8 不同 Ca^{2+} 浓度条件下电阻随时间变化曲线Fig. 8 Curves of resistance-time under different Ca^{2+} Molar amounts

不同化学试剂条件下电流随时间的变化规律如图9所示。纯电渗试验D的电流随时间基本呈线性降低,C_{1.0}、C_{1.5}和N_{1.0}由于化学溶液的参与,电流呈现先增大后减小的规律。试验N_{1.0}的外加阳离子总量是L未加 Na_2SiO_3 前的4倍、C_{1.0}的2倍,说明电流增大程度

和阳离子总量正相关。同时,试验L加入 Na_2SiO_3 后电流的突增和有效电阻的骤减也证明了注入阳离子对提高土样导电性的作用。试验L的排水量是试验D的1.62倍,试验L中的化学胶结作用在提高电渗排水量的同时也一定程度上削弱了电渗过程中电流衰减的现象。

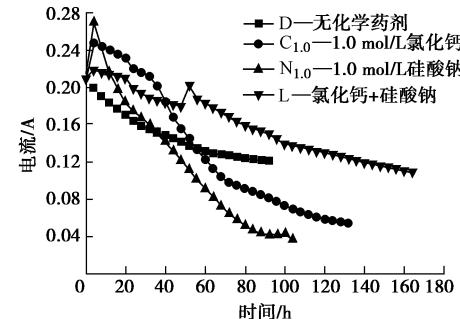


图9 不同化学试剂条件下电流随时间变化曲线

Fig. 9 Curves of current-time under different tests

不同化学试剂条件下有效电阻随时间的变化曲线如图10所示。由图10可见,N_{1.0}试验前期有效电阻随时间缓慢增加,之后曲线斜率增大,有效电阻增大速度加快。由于排水的不均匀,土体发生不均匀沉降并伴随裂缝的产生(见图11),66 h裂缝持续扩展并在土样中间出现贯穿裂缝,有效电阻突然增大。C_{1.0}有效电阻变化规律和N_{1.0}相似,但其排水速率比N_{1.0}慢,裂缝贯穿时间比N_{1.0}晚。纯电渗试验D和试验L有效电阻随时间基本呈现线性增加。和其他3组试验相比纯电渗试验D由于没有外加阳离子的参与,电渗排水缓慢,土样中含水率分布相对均匀,基本没有发生不均匀沉降和产生裂缝现象,有效电阻随时间变化相对平缓。L试验由于土样中 CaCl_2 和 Na_2SiO_3 两种溶液发生胶凝反应生成 CaSiO_3 沉淀,因水流渗透和不均匀沉降产生的微小裂缝被沉淀物填充,阻止了裂缝的继续扩展,维持了土样的连续性。对比C_{1.0}、N_{1.0}试验的有效电阻变化规律,L试验较好的土样连续性降低了有效电阻的增大速率,改变了电阻陡增的现象。其有效电阻随时间变化趋势呈现和D试验类似规律,电渗过程中有效电阻随时间线性增长。

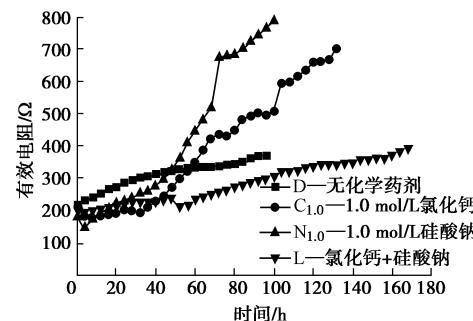


图10 不同化学试剂条件下有效电阻随时间变化曲线

Fig. 10 Curves of resistance-time under different tests



(a) 裂缝全局图 (b) 裂缝局部图

图 11 土体中部裂缝

Fig. 11 Crack in soil after $N_{1.0}$ test

注入阳离子量对改善土样导电性有效；但是，阳离子总量越多，电渗处理后土样的不均匀沉降越严重，裂缝越多，有效电阻增大越明显。 $CaCl_2$ 、 Na_2SiO_3 和黏土颗粒之间的胶凝作用可改善土样在电渗过程中产生裂缝的现象，维持土样的连续性。

3.3 电能损耗

电能损耗是电渗试验的重要参考指标。为了比较不同试验的电能消耗，图 12、13 对比了各组试验中土样排出单位体积的水需要消耗的电能即耗能系数 C ，其表达式为

$$C = \frac{\int_{t_1}^{t_2} UIdt}{V_2 - V_1} \quad (2)$$

式中 U 为 t_1 到 t_2 时间段的输出电压值 (V)，本次试验全部采用恒定电压 50 V； I 为 t_1 到 t_2 时间段的输出电流值； V_2 为 t_2 时试验累计排水量 (mL)； V_1 为 t_1 时试验累计排水量 (mL)。

不同 Ca^{2+} 离子量试验条件下耗能系数随时间的变化曲线如图 12 所示。

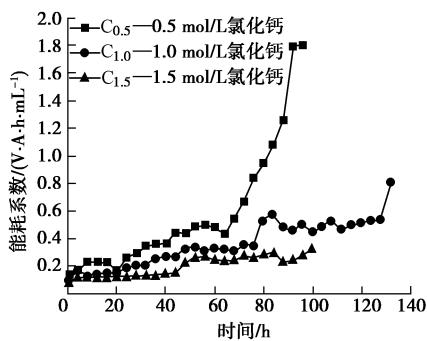


图 12 不同 Ca^{2+} 离子量条件下耗能系数随时间变化曲线

Fig. 12 Curves of energy coefficient-time under different Ca^{2+}

Molar amounts

由图 12 可知，试验过程中耗能系数随时间逐渐增大。试验 $C_{0.5}$ 能耗增大现象最明显，这是因为 $C_{0.5}$ 中阳离子浓度最低，随着自由水的排出，可用于离子交换的阳离子数量有限，而土样中弱结合水脱离土颗粒的吸附力成为自由水需要消耗更多能量，所以耗能系数增加明显。 $C_{1.0}$ 和 $C_{1.5}$ 试验后期界面电阻增大和裂

缝的扩展降低了电能利用率，能耗系数增大。 $C_{0.5}$ 试验平均能耗约为 $C_{1.0}$ 的 2 倍， $C_{1.5}$ 的 3 倍。说明增加阳离子量对解决电渗后期能耗过大的问题有效。

不同化学试剂条件下耗能系数随时间的变化曲线如图 13 所示。吸附在土颗粒表面的水分子极易和溶液中的阳离子结合成水化阳离子，阳离子的数量直接关系到离子吸附和交换作用的程度。相对于其它几组试验，纯电渗试验 D 没有外加化学试剂，电渗过程中可携带水分子迁移的阳离子最少，耗能最大。试验 $N_{1.0}$ 中外加阳离子总量是试验 $C_{1.0}$ 的 2 倍，但两组试验的耗能系数基本相同， $N_{1.0}$ 并未显示出阳离子数量较多的优势。这是因为溶液中高价阳离子可使土粒周围的扩散层水膜变薄，土样的渗透性增强， $C_{1.0}$ 试验 Ca^{2+} 总量相对 $N_{1.0}$ 试验 Na^+ 较少的不利因素得到弥补。试验 L 外加了 Ca^{2+} 和 Na^+ 两种阳离子，但 Ca^{2+} 和 SiO_3^{2-} 结合成 $CaSiO_3$ 沉淀，填充到土样孔隙中，降低了土样渗透性的同时也减少了可在电场中自由移动的阳离子，因此 $N_{1.0}$ 的耗能系数大于 $N_{1.0}$ 和 $C_{1.0}$ 。纯电渗试验 D 平均能耗约为 L 的 1.2 倍， $C_{1.0}$ 的 2.2 倍， $N_{1.0}$ 的 3.5 倍。由此得出，可自由移动的阳离子量和土样的渗透性变化共同影响着电渗排水的能耗。

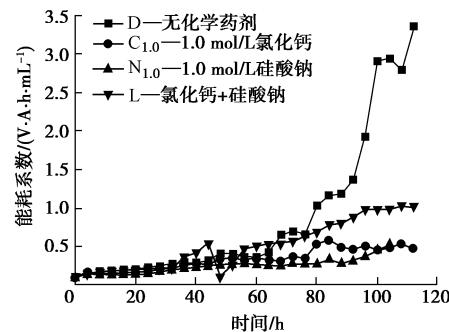


图 13 不同化学试剂条件下耗能系数随时间变化曲线

Fig. 13 Curves of energy coefficient-time under different tests

3.4 含水率分布

试验结束后按图 2 所示测点位置测定了土样的含水率，不同 Ca^{2+} 离子量条件下含水率分布对比曲线如图 14 所示。由图 14 可知，从阳极到阴极土样的含水率逐渐增大，距阳极越近含水率越低，距阴极越近含水率越高。含水率的分布规律和阳离子在电场中的移动方向一致，说明电渗排水的过程就是阳离子吸附水分子并在电场作用下迁移到阴极的过程。以土样中间部位为分界点，试验 $C_{1.5}$ 两侧含水率差异较大，靠近阳极部分 $C_{1.5}$ 含水率小于 $C_{1.0}$ ，靠近阴极部分 $C_{1.5}$ 含水率大于 $C_{1.0}$ 。如果用试验结束后阴极附近土样含水率和阳极附近土样含水率的比值来表示含水率分布不均情况，结果发现 $C_{1.5}$ 比值为 2.1， $C_{1.0}$ 比值为 1.6， $C_{0.5}$ 比值为 1.4。由此说明，阳离子浓度越大，排水效

率越高, 但含水率分布不均现象越明显。

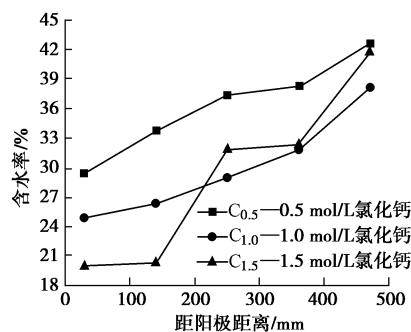


图 14 不同 Ca^{2+} 离子量条件下含水率分布曲线

Fig. 14 Distributions of water content under different Ca^{2+} Molar amounts

不同化学试剂条件下含水率分布曲线如图 15 所示。纯电渗试验 D, 因为排水缓慢, 试验结束后土样平均含水率最高, 但分布最为均匀。试验 $\text{N}_{1.0}$ 的化学溶液中含 Na^+ 离子和 SiO_3^{2-} 离子, 其中 Na^+ 离子在电场作用下移动, 并大量汇聚在阴极附近土样中, 土粒表面的双电层 Na^+ 离子交换比率较高, 降低了土样的渗透性能。同时, 黏土颗粒的 SiO_2 选择性吸附相似 SiO_3^{2-} 离子使其表面负电荷量增大, 静电作用力增强, 粘粒表面水膜变厚, 弱结合水所占比例增大, 阴极附近含水率较高, 阴阳两极附近土样含水率差异明显。试验 L 由于胶凝反应的发生, 保持了土样的连续性, 含水率分布更均匀。但因损失了可自由移动的阳离子, 排水效率降低, 阳极附近含水率相对较高。对比阴阳电极附近测点土样含水率比值, D 为 1.3, L 为 1.5, $\text{C}_{1.0}$ 为 1.6, $\text{N}_{1.0}$ 为 2.1。说明试验 L 中 CaCl_2 和 Na_2SiO_3 溶液的胶结作用可改善电渗排水后含水率分布不均情况。与 Chien 等^[27]的试验结果对比, 本试验结果从降低土样含水率方面效果明显。

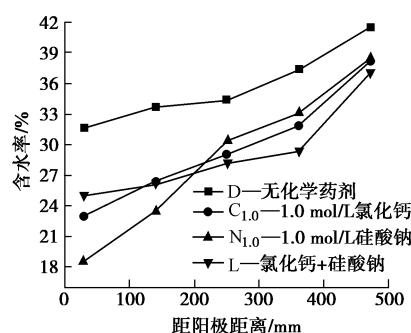


图 15 不同化学试剂条件下含水率分布曲线

Fig. 15 Distributions of water content under different tests

3.5 抗剪强度分布

试验结束后按图 2 所示测点位置进行抗剪强度测试, 不同 CaCl_2 浓度条件下抗剪强度的分布如图 16 所示。抗剪强度分布规律和含水率分布相似, 阳极附

近土样强度最大, 且距离阳极越远强度越低, 阴极附近土样强度最低。对比距阳极 250 mm 范围内的土样抗剪强度发现, CaCl_2 浓度越高, 强度提升越明显, 而 3 组试验距阳极 250 mm 范围外的土样抗剪强度基本一致, 说明电渗过程增加阳离子浓度可提高阳极附近土样强度, 但对提高阴极附近土样强度作用微弱。

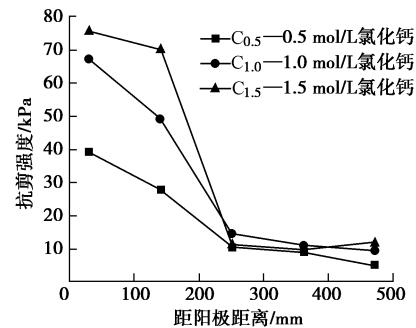


图 16 不同 Ca^{2+} 离子量条件下抗剪强度分布曲线

Fig. 16 Distributions of shear strength under different Ca^{2+} Molar amounts

不同化学试剂条件下电渗排水固结后土样的抗剪强度分布曲线如图 17 所示。加入化学溶液后土样强度显著提升, 且距阳极距离越近强度提升现象越明显。试验选取距阳极 30 mm 处土样进行强度对比, 与纯电渗试验相比, 加入 Na_2SiO_3 溶液的 $\text{N}_{1.0}$ 试验强度提升 133.9%; 加入 CaCl_2 溶液的 $\text{C}_{1.0}$ 试验强度提升 108.2%; 联合注入 CaCl_2 和 Na_2SiO_3 的 L 试验强度提升 65.3%。联合图 15 和图 18 可知, 距阳极 30 mm 处土样的含水率越低, 其抗剪强度越高, 说明排水固结是阳极附近土样强度提升的主要原因。

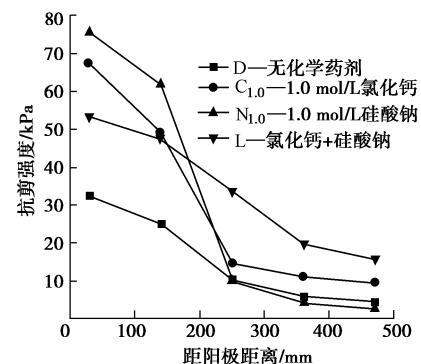
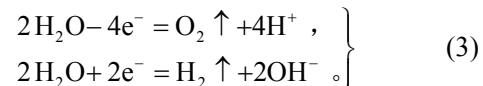


图 17 不同化学试剂条件下抗剪强度分布

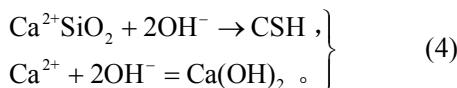
Fig. 17 Distributions of shear strength under different tests

由于两端电极在电渗过程中发生如下电解反应, 并伴随生成 H^+ 离子和 OH^- 离子, 导致阳极附近酸性增强, 阴极附近碱性增强。



而 CaCl_2 和 Na_2SiO_3 溶液的化学胶凝反应以及

Ca^{2+} 离子和 OH^- 离子间的火山灰反应易于在碱性环境中发生:



因此,在距阳极250~500 mm范围内,试验L强度提高效果最好,试验C_{1.0}次之,试验N_{1.0}因为没有化学加固作用参与,强度提高效果最弱。电解反应扩大了化学反应的影响范围,化学加固作用是阴极附近土样抗剪强度提高的主要原因。

为了对比试验结束后土样抗剪强度分布的均匀性,本文采用以5个测点中抗剪强度最大值和抗剪强度最小值的比值作为参照。试验L,D,C_{1.0},N_{1.0}的这一比值分别为3.40,7.08,7.34,27.69,试验L的抗剪强度分布更加均匀。从土样抗剪强度提高的整体角度分析,相对与纯电渗试验D,联合注入 CaCl_2 和 Na_2SiO_3 的试验L强度提高了119.8%,加入 Na_2SiO_3 溶液的试验N_{1.0}强度提高了99.6%,加入 CaCl_2 溶液的试验C_{1.0}强度提高了95.9%。电渗过程中联合注入 CaCl_2 和 Na_2SiO_3 溶液在提高土样抗剪强度的同时也保证了土样整体的均匀性,此规律和Chien等^[27]的试验结果基本一致。

3.6 孔隙比和沉降

试验结束后按图2所示测点位置进行孔隙比测试,分析土样密实度变化。图18给出了试验注入不同化学溶液进行电渗后土样各测点处的孔隙比。试验D、C_{1.0}、N_{1.0}、L土样的孔隙比平均值分别为0.97,0.77,0.78,0.75,说明电渗过程中注入盐溶液可降低电渗处理后土样的孔隙比,联合注入 CaCl_2 和 Na_2SiO_3 溶液有利于提高电渗后土样整体密实度。

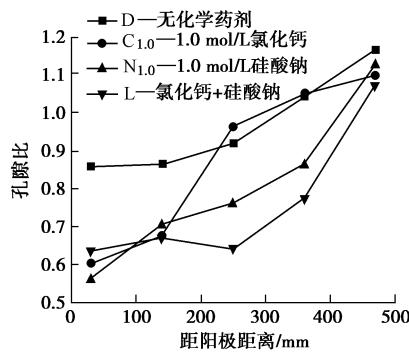


图18 不同化学试剂条件下土样孔隙比

Fig. 18 Curves of void ratio-position under different tests

土样密实度的提高主要源于孔隙水的消散和填充物的加密。阳极土样密实度的提高主要依靠孔隙水的消散,排水量越大密实度越高。对比其他三组试验,试验L在土体中部即PPR管附近土样的密实度提升效果尤其明显,证明 CaCl_2 和 Na_2SiO_3 溶液的化学胶凝

作用对PPR管附近土样加固效果突出。同时,化学作用削弱了阴阳两极土样密实度的差异度。

电渗过程中,由于排水固结作用,土样发生沉降现象。图19显示了不同化学溶液条件下电渗处理后土样的高度变化。试验开始前土样填充高度为200 mm,电渗结束后试验D、C_{1.0}、N_{1.0}、L的土样平均高度分别为190.0,181.9,180.6,183.2 mm,联系各组试验的排水量发现(图5),土体沉降量和电渗排水量正相关。试验D电渗排水进程缓和,裂缝扩展相对微弱,土体沉降最为均匀。

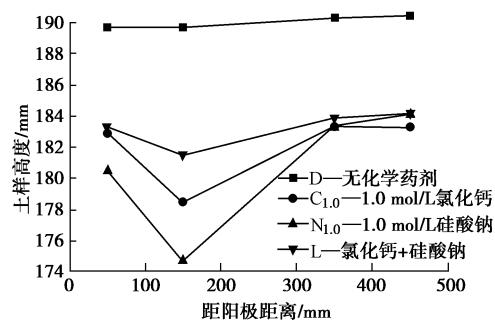


图19 不同化学试剂条件下土样沉降

Fig. 19 Curves of settlement-position under different tests

由图19可知,土样中间偏向阳极一侧土体沉降过大是引起土样不均匀沉降的主要原因。根据电渗后土样含水率的分布规律分析(图15),阳极附近土样含水率最低,孔隙水流失最多,沉降量应该最大,但试验结果显示,土样中间偏向阳极侧位置处的沉降量最大,整个土样近似呈现两边高中间低的凹形。这是由于阳极土样位于模型槽边缘处,边界效应减弱了土体的沉降。同时,由于土样排水量差异引起的不均匀沉降在土样中间位置产生裂缝,该土层的排水通道下移,渗流路径发生改变,受渗流路径的影响,裂缝处土样沉降最为严重。试验D由于电渗排水进程缓和,裂缝扩展相对微弱,土体沉降最为均匀,但其固结程度亦最弱。根据化学溶液注入位置可知,联合注入 CaCl_2 和 Na_2SiO_3 的试验L在土样中部化学加固反应最为剧烈,削弱了中部土样的沉降变形,改善了电渗处理后土体不均匀沉降的问题。

4 结论

本文通过化学联合电渗对比试验,研究了化学作用和电渗作用的相互影响,可以得到如下3点结论。

(1) 电渗过程中增加阳离子总量可增强电渗排水效果,改善土体导电性,提高电渗处理后土体抗剪强度;但是阳离子总量越大,电渗处理后土体含水率和抗剪强度分布不均现象也相对越明显。

(2) 本文试验条件下,与纯电渗试验相比,联

合注入 CaCl_2 和 Na_2SiO_3 溶液的电渗试验土样平均抗剪强度提高了 119.8%, 较单独加入 Na_2SiO_3 或 CaCl_2 溶液多提高约 20%。电渗作用扩大了 CaCl_2 和 Na_2SiO_3 的化学胶结作用对土样的加固范围, CaCl_2 和 Na_2SiO_3 的化学胶结作用可改善电渗处理后土体含水率和抗剪强度分布不均匀的现象, 联合注入 CaCl_2 和 Na_2SiO_3 的电渗试验土体加固效果相对更好。

(3) CaCl_2 和 Na_2SiO_3 的化学胶凝作用在增强电渗加固效果的同时保持了土体的连续性, 但在一定程度上也影响了电渗的排水效果。此外, 该方法仍然存在能耗较大的问题, 寻求 CaCl_2 和 Na_2SiO_3 溶液的最佳配合比, 以找到兼顾增强排水加固土体效果和降低能耗的最优方案, 仍是下一步努力研究的方向。

参考文献:

- [1] ESRIG M I. Pore pressures, consolidation, and electrokinetics[J]. Journal of the Soil Mechanics & Foundations Division, 1968, **94**(4): 899 – 922.
- [2] SHANG J Q. Electroosmosis-enhanced preloading consolidation via vertical drains[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2011, **35**(3): 491 – 499.
- [3] 庄艳峰, 王 钊. 电渗的电荷累积理论[J]. 岩土力学, 2005, **26**(4): 629 – 632. (ZHUANG Yan-feng, WANG Zhao. Electric charge accumulation theory for electro-osmotic consolidation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, **26**(4): 629 – 632. (in Chinese))
- [4] CHIEN S C, OU C Y. A novel technique of harmonic waves applied electro-osmotic chemical treatment for soil improvement[J]. Applied Clay Science, 2011, **52**(3): 235 – 244.
- [5] 刘飞禹, 王 军, 符洪涛, 等. 逐级加载电压对电渗加固吹填土的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, **33**(12): 2582 – 2591. (LIU Fei-yu, WANG Jun, FU Hong-tao. Influence of applying stepped voltage in electroosmotic reinforcement of dredger fill[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, **33**(12): 2582 – 2591. (in Chinese))
- [6] 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): 709 – 714. (LI Ying, GONG Xiao-nan, ZHANG Xue-chan. Experimental research on effect of applied voltage on one-dimensional electroosmotic drainage[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(3): 709 – 714. (in Chinese))
- [7] LO K Y, INCULET I I, HO K S. Electroosmotic strengthening of soft sensitive clays[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1991, **28**(1): 62 – 73.
- [8] 李一雯, 周 建, 龚晓南, 等. 电极布置形式对电渗效果影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2013, **34**(7): 1972 – 1978. (LI Yi-wen, ZHOU Jian, GONG Xiao-nan. Experimental research on influence of electrode array on electroosmotic effect[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, **34**(7): 1972 – 1978. (in Chinese))
- [9] JONES C J F P, LAMONT-BLACK J, GLENDINNING S, et al. Treatment of lagooned sewage sludge in situ using electrokinetic geosynthetics[J]. Geosynthetics International, 2008, **15**(3): 192 – 204.
- [10] GLENDINNING S, LAMONT-BLACK J, JONES C J. Treatment of sewage sludge using electrokinetic geosynthetics[J]. Journal of Hazardous Materials, 2007, **139**(3): 491 – 499.
- [11] FENG Y, ZHAN T L T, CHEN Y M, et al. Laboratory study on electrokinetic dewatering of sewage sludge[M]. Berlin: Springer, 2010.
- [12] 陶燕丽, 周 建, 龚晓南, 等. 铁和铜电极对电渗效果影响的对比试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(2): 388 – 394. (TAO Yan-li, ZHOU Jian, GONG Xiao-nan. Comparative experiment on influence of ferrum and cuprum electrodes on electroosmotic effects[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, **35**(2): 388 – 394. (in Chinese))
- [13] 胡俞晨, 王 钊, 庄艳峰. 电动土工合成材料加固软土地基实验研究[J]. 岩土工程学报, 2005, **27**(5): 582 – 586. (HU Yu-chen, WANG Zhao, ZHUANG Yan-feng. 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))
- [14] 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 Wei-lie, YANG Jin-xin, 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))
- [15] 孙召花, 余湘娟, 高明军, 等. 真空-电渗联合加固技术的固结试验研究[J]. 岩土工程学报, 2017, **39**(2): 250 – 258. (SUN Zhao-hua, YU Xiang-juan, GAO Ming-jun. Experimental studies on vacuum preloading incorporated with electro-osmosis consolidation for dredger fill[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, **39**(2): 250 – 258. (in Chinese))

- [16] 王柳江, 刘斯宏, 王子健, 等. 堆载-电渗联合作用下的一维非线性大变形固结理论[J]. 工程力学, 2013, **30**(12): 91 - 98. (WANG Liu-jiang, LIU Si-hong, WANG Zi-jian. A consolidation theory for one-dimensional large deformation problems under combined action of load and electroosmosis[J]. Engineering mechanics, 2013, **30**(12): 91 - 98. (in Chinese))
- [17] 符洪涛, 王军, 蔡袁强, 等. 低能量强夯-电渗法联合加固软黏土地基试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, **34**(3): 612 - 620. (FU Hong-tao, WANG Jun, CAI Yuan-qiang, et al. Experimental study of combined application of electro-osmosis and low-energy dynamic compaction in soft ground reinforcement[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, **34**(3): 612 - 620. (in Chinese))
- [18] 李瑛, 龚晓南. 含盐量对软黏土电渗排水影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(8): 1254 - 1259. (LI Ying, GONG Xiao-nan. Experimental study on effect of soil salinity on electro-osmotic dewatering in soft clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(8): 1254 - 1259. (in Chinese))
- [19] CHIEN S C, OU C Y, WANG M K. Injection of saline solutions to improve the electro-osmotic pressure and consolidation of foundation soil[J]. Applied Clay Science, 2009, **44**: 218 - 224.
- [20] CHIEN S C, OU C Y, LEE Y C. A novel electroosmotic chemical treatment technique for soil improvement[J]. Applied Clay Science, 2010, **50**(4): 481 - 492.
- [21] BURNOTTE F, LEFEBVRE G, GRONDIN G. A case record of electroosmotic consolidation of soft clay with improved soil-electrode contact[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2004, **41**(6): 1038 - 1053.
- [22] ASAVIDORNEJA P, GLAWE U. Electrokinetic strengthening of soft clay using the anode depolarization method[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2005, **64**(3): 237 - 245.
- [23] SHANG J Q, MOHAMEDELHASSAN E, ISMAIL M. Electrochemical cementation of offshore calcareous soil[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2011, **41**(5): 877 - 893.
- [24] OU C Y, SHAOCHI C, WANG Y G. On the enhancement of electroosmotic soil improvement by the injection of saline solutions[J]. Applied Clay Science, 2009, **44**(1/2): 130 - 136.
- [25] ALSHAWABKEH A N, SHEAHAN T C, WU X. Coupling of electrochemical and mechanical processes in soils under DC fields[J]. Mechanics of Materials, 2004, **36**(5): 453 - 465.
- [26] 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.
- [27] CHIEN S C, OU C Y, WANG Y H. Soil improvement using electroosmosis with the injection of chemical solutions: laboratory tests[J]. Journal of the Chinese Institute of Engineers, 2011, **34**(7): 863 - 875.