

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2015.03.011

导电塑料排水板加固吹填土现场试验

孙召花¹,高明军¹,刘志浩²,周伟³

(1. 河海大学岩土工程科学研究所,江苏 南京 210098; 2. 江阴市华宏盈飞电渗科技有限公司,江苏 江阴 214423;
3. 南通市民防(人防)工程管理中心,江苏 南通 226001)

摘要:在阐述电渗复合真空预压法加固原理的基础上,依托湖北省离岛梁子湖国家水生生态展示馆吹填软基处理工程,进行电渗复合真空预压现场试验,对导电塑料排水板的性能和电渗排水加固效果进行实地验证。现场试验结果表明:经过28 d的电渗复合真空预压法加固,地基土土体物理力学性质指标和承载力得到明显提高;使用导电塑料排水板进行的电渗复合真空预压处理吹填土不仅能够缩短工期、节省能耗,还能够获得理想的加固效果。

关键词:导电塑料排水板;电渗法;真空预压法;吹填淤泥;现场试验

中图分类号:TU413;TU447 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1980(2015)03-0255-06

Field test on consolidation of dredger fill using electric vertical drains

SUN Zhaohua¹, GAO Mingjun¹, LIU Zhihao², ZHOU Wei³

(1. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Jiangyin Huahong Yingfei Electroosmosis Technology Co. Ltd., Jiangyin 214423, China;
3. Management Center of Nantong Civil Defense (Air Defense) Engineering, Nantong 226001, China)

Abstract: Based on the consolidation mechanism of the combined electroosmosis-vacuum preloading method, a field test was conducted on the hydraulically filled soft foundation treatment project in the Liangzi Lake Aquatic Ecological Exhibition Hall on Li Island, in Hubei Province. The performance of electric vertical drains (EVD) and the consolidation effect of electroosmosis were evaluated. The field test results show that the physico-mechanical properties and bearing capacity of the foundation soil are improved significantly after a 28-day treatment. The electroosmosis-vacuum preloading method using EVD can not only reduce the construction time and energy consumption, but also achieve the ideal consolidation effect.

Key words: electric plastic vertical drains; electroosmosis method; vacuum preloading method; dredger fill; field test

随着我国经济建设的飞速发展,土地资源日益紧张,围海、围湖造地工程及码头堆场工程等沿海、沿湖、沿江岸边工程逐渐成为扩大用地的重要途径。这类工程软土地基分布广泛,主要由淤泥、淤泥质土或其他高压缩性土构成,其孔隙比和天然含水率大、压缩性高、透水性弱、承载能力很低。相比于天然沉积的软土,经过吹填的疏浚土结构性往往被破坏^[1]、含水率和压缩性更高、强度更低、欠固结特性较强且处理难度更大。传统的真空预压、堆载预压等重力排水固结方法处理低渗透性软土地基历时长久,且对吹填土中的大量结合水无能为力^[2],因此电渗法再次引起人们的重视。电渗法是通过在插入土体的电极上施加低压直流电来加速排水固结的一种地基处理方法,具有加固速度快、对土体中的自由水及结合水同样有效及电渗排水速率与土颗粒粒径无关等特点^[3],因此对处理细颗粒、低渗透性土有良好的应用前景。

1809年,莫斯科大学的Reuss^[4]发现了土体中的电渗、电泳现象。随后,Helmholtz等^[5]学者展开对电渗现象及其机理的研究,提出了不同的电渗模型。1939年,德国的Casagrande^[6]首次将电渗法成功应用于铁路

路堑的开挖与稳定中。此后,美国^[7]、加拿大^[8]等国家对电渗法进行了广泛研究,并将其应用于不同领域。我国在 20 世纪 50 年代末开始对电渗法进行研究,曾国熙等^[9]通过室内模型试验,对电化学加固后的软黏土物理力学指标改善情况进行分析。近 30 a,我国在电渗法现场工程应用及现场试验^[10-12]方面的研究较少,多数集中在室内试验研究^[13-14]。由于传统电渗法使用的金属电极容易腐蚀、耗电量大,且难以获得理想的加固效果,因此电渗法并未像传统的真空预压法、堆载预压法一样获得广泛应用。2012 年,我国研制出一种导电塑料排水板,其由两面均设有凹槽的基板、金属丝和滤膜等组成,基板由导电塑料制成,金属丝贯穿其中,滤膜包裹^[15]。笔者利用导电塑料排水板代替传统金属电极进行电渗复合真空预压法处理吹填土的现场试验,并对导电塑料排水板的性能及其工程应用特性进行探索。

1 电渗复合真空预压法加固原理

饱和吹填土在电渗作用下的单向固结模型是一个侧壁和底部均不能透水,内部有活塞和弹簧的冲水容器,如图 1 所示。弹簧模拟土骨架,容器中的水模拟土孔隙水,活塞上竖直贯通的小孔模拟导电塑料排水板的排水条件。电源开启后,阳极附近的水不断向阴极汇聚,阴极处的水越聚越多,水流开始沿着阴极处竖直贯通的小孔向外排出。由于弹簧骨架并未受到外力的作用,即附加有效应力 $\sigma' = 0$,即使水排出后,土体体积不会发生压缩变形,从而形成具有大量孔洞的骨架结构。因此,经电渗处理后的土体,其剪切强度和承载力均较小,需与其他工法相结合。

真空预压法的原理是在不改变土体总应力的情况下,通过水平及竖直排水系统处形成的真空渗流场,引起土体中孔隙水应力的降低,使得土体中的水排出,同时降低的孔隙水压力转化为土骨架的有效应力,从而使土体发生固结。由于真空度在新近吹填淤泥中的传递损失较大,深部淤泥中的真空度存在一个启动时间^[15],因此表层处理效果较好。

通过对电渗法和真空预压法加固地基的基本原理进行分析可以看出,当使用导电塑料排水板作为排水通道、真空度传递载体及电极时,电渗法可以使土体孔隙水从阳极移向阴极,而真空预压法却可以使土体孔隙水以每一根导电塑料排水板为中心发生环向渗流,可见电渗法与真空预压法引起的土中水渗流方向不一致。当电渗法与真空预压法同时对地基进行加固处理时,若两者引起的水渗流方向一致,会加速孔隙水的排出,若渗流方向不一致,会阻碍孔隙水的排出。

2 工程概况

试验场地位于湖北省鄂州市梧桐湖新区离岛,该岛拟建梁子湖国家水生态展示馆工程。场地由周边湖区清淤吹填而成,总面积为 27 万 m²,吹填淤泥平均深度为 4 ~ 6 m。吹填湖相淤泥质土含有机质较多,结构性已遭到破坏,吹填施工完成后,静置 3 个多月仍为流塑状态。根据业主要求,地基处理的目标为:对吹填土层进行预处理,预处理后的场地满足施工机械设备进场要求,地基表面承载力不低于 50 kPa。为使该地块尽早投入使用,并为后续施工提供良好的作业平台,选取长为 26.0 m、宽为 25.0 m 的试验场地进行电渗复合真空预压法试验,试验使用导电塑料排水板进行软基处理。试验区吹填土的主要物理力学指标见表 1。

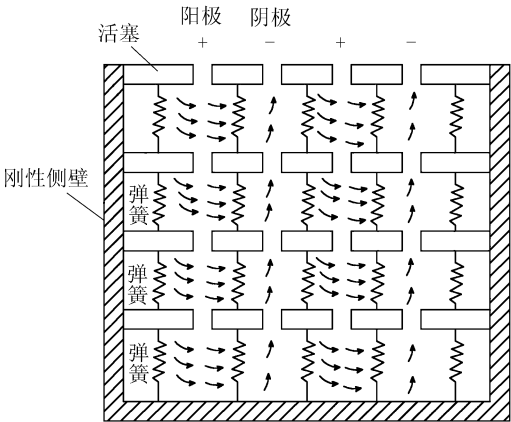


图 1 饱和吹填土的电渗单向固结模型
Fig. 1 One-dimensional consolidation model of saturated dredger fill treated by electroosmosis method

表 1 试验区吹填土的主要物理力学指标

Table 1 Main physico-mechanical properties of dredger fill in test area

密度/ (g · cm ⁻³)	渗透系数/ (cm · s ⁻¹)	含水率/ %	液限/ %	塑限/ %	塑性 指数	颗粒质量分数/%		
						黏粒	粉粒	极细砂
1.42	4.91×10 ⁻⁶	124	58.2	34.0	24	46.5	51.4	2.1

3 电渗复合真空预压现场试验设计

3.1 试验方案

自 2013 年 9 月开始进行施工准备、清理场地、插板、铺膜等一系列工作。由于软基太软,无法进行上砂作业,因此采用无砂垫层真空预压法,施工过程中应避免地表浮泥堵塞排水系统^[16]。2013 年 10 月 1 日所有准备工作就绪,开始抽真空。真空预压贯穿试验的整个过程,并且期间多次破膜测土体含水率,当土体含水率降低约 30% 时开启电渗电源。所用电源为 80 V/2 000 A 的直流电源,电源的电压、电流可控,电源可在稳流、稳压 2 种模式下工作,且可随时进行电极转换,电源具有过载保护等安全措施。导电塑料排水板共布置 702 根,如图 2 所示,共 13 列正极、13 列负极,每列有 27 根导电塑料排水板,所有导电塑料排水板阴、阳电极构成并联电路,每对电极之间的电压相等。

整个电渗复合真空预压排水加固处理工作结束以后,现场进行静力触探、十字板剪切及载荷板试验,采用薄壁取土器取样进行室内土工试验。通过对加固前后的地基土承载力及物理力学参数进行对比,判断导电塑料排水板作为电极、排水通道、真空度传递的可行性,及其对土体的改善效果。

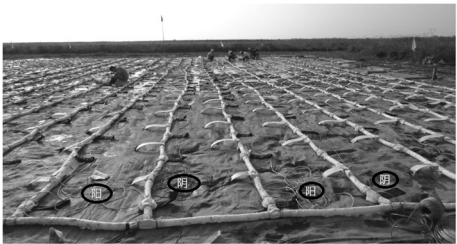


图 2 阴阳电极布置

Fig. 2 Layout of positive and negative electrodes

3.2 监测与检测点位布置

为检验使用导电塑料排水板进行电渗复合真空预压法加固超软吹填土的效果,对试验区的沉降、真空度、孔隙水压力进行监测,并对试验后的场地进行原位检测。考虑到工程地质条件的要求,孔压计共埋设 3 只,采取一孔一计的方法埋设,埋设深度分别为 1 m、3 m、5 m。沉降板布置 3 个,分别位于场地中心、吹填土层最厚和最浅的位置。真空表设置 1 个,用于监测膜下真空度。原位检测包括沿场地对角线进行了 3 组静力触探试验,并在其临近位置对应进行了十字板剪切试验,同时在试验场地进行了一组平板载荷试验。

4 电渗复合真空预压试验结果分析

4.1 电流、电压及排水速率变化

电极通电后电流、电压变化曲线如图 3 所示,为了使图像更清晰,分别绘于 2 组图中。为选取适当的稳流稳压通电方式,首先开启电源进行 400 A 稳流通电,电压在 23 h 内平稳变化,间歇 10 h 后,启动电压明显降低,但电压增长速度提高很多,在 8 h 时间内由 23 V 增长到 39 V,随后趋于平缓,此阶段通过收集射流泵处集水箱所排出的水,获得平均排水速率为 9.7 L/min。试验初期,由于土体中的自由水含量较大,因此单独真空预压时的平均排水速率为 8.9 L/min。第 31 h 进行 30 V 稳压通电,电流在 360 ~ 280 A 之间平缓变化,此阶段的平均排水速率为 9.3 L/min。进行反向 400 A 稳流通电后,电压在 10 h 的时间内由 27 V 增大到 61 V,平均排水速率为 8.5 L/min。随后,进行反向 60 V 稳压通电,经过 14 h,电流由 460 A 降至 225 A,平均排水速率为 6.4 L/min。间歇一晚后,开始 300 A 稳流通电,电压 1 h 的时间内上升了 34 V,因此不得不再次进行间歇通

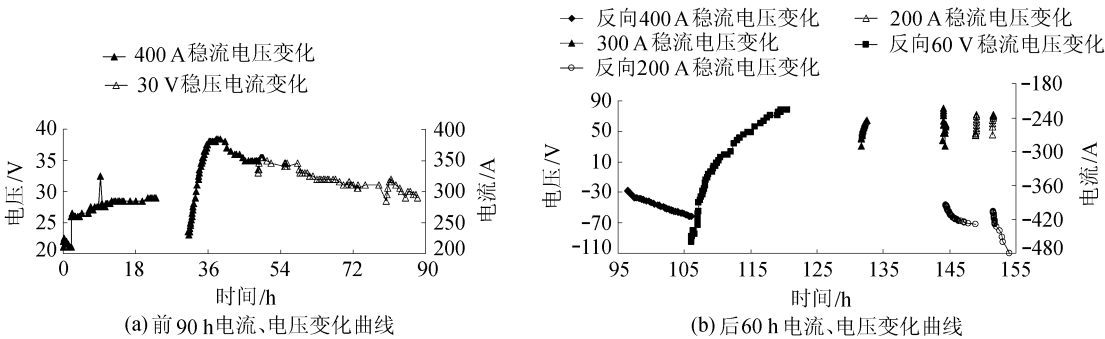


图 3 试验阶段电流、电压变化曲线

Fig. 3 Variation curves of current and voltage during test

电,但情况并没有改善。改为反向 200 A 稳流通电后,电压可维持 5 h 的有效时长。在电渗的最后阶段,无论是正向还是反向稳流通电,电压迅速达到电源最大限定电压;而尝试进行 75 V 稳压通电时,电流始终低于 100 A,排水效果不明显,电渗通电终止。

4.2 监测结果分析

4.2.1 真空度

试验场地于 2013 年 10 月 1 日开始抽真空,开始抽真空后 2 h 内,排水管中的真空度即可达到 80 kPa 以上,后续真空度缓慢持续增长,稳定在 91 kPa 左右。开始电渗后,放置射流泵的水箱中气泡增多,然而并未引起真空度下降。排水管采用直径 50 mm 的波纹滤管,由于环刚度不足,在抽真空一段时间后出现吸扁、吸裂等现象,但未完全闭合,仍有传递真空度和排水的功能。因此,在满足排水流量的前提下,建议选用直径稍小的波纹滤管以提高其环刚度。

4.2.2 孔隙水压力

试验场地共布置 3 只孔压计,分别位于 1 m、3 m 和 5 m 深度,1 m 处孔隙水压力初始值为 15.06 kPa,经过 28 d 抽真空及电渗作用,下降到 1.42 kPa,变化幅度为 13.64 kPa。而 3 m 和 5 m 处的孔隙水压力时程曲线比较平稳,其孔隙水压力降低值分别为 7.33 kPa、6.91 kPa,如图 4 所示。随着深度的增加,孔隙水压力降低值逐渐减小,这是由于:(a)软土地基在真空预压的持续作用下,上部土体形成一个硬壳层;(b)细小土颗粒沿渗流方向及真空吸力方向移动使得导电塑料排水板与普通塑料排水板周围形成“土柱”,这两方面都将阻碍真空度的传递,不利于孔隙水压力消散。

4.2.3 表面沉降

试验场地表面沉降量随着电渗真空预压的进行逐渐增大,在进行到第 25 天后,沉降趋于稳定,每天沉降量在 5 mm 左右,第 28 天的沉降量仅为 3 mm。沉降板 1~3 的总沉降量分别为 46.9 cm、57.4 cm、58 cm,如图 5 所示。试验在加固前后,分别对场地的相对高程进行了水准测量,以了解经过加固后,场地高程的整体沉降量,同时也可校核沉降板观测的准确度。

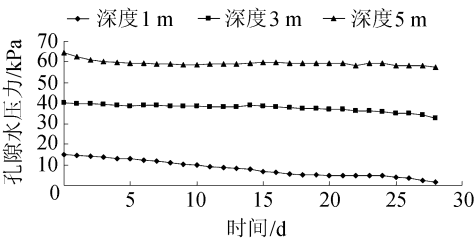


图 4 孔隙水压力时程曲线

Fig. 4 Time-history curve of pore water pressure

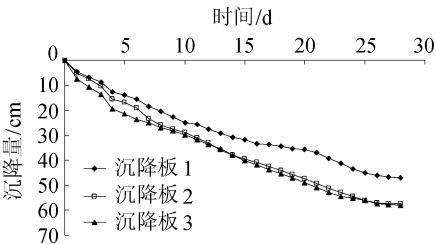


图 5 场地表面沉降量时程曲线

Fig. 5 Time-history curve of surface settlement in test area

4.3 检测结果分析

4.3.1 静力触探试验

静力触探试验采用手摇式单桥静力触探仪,加固前,对吹填淤泥进行静力触探试验,加固前的淤泥几乎没有强度。试验结束后,场地内选择 2 个试验点进行静力触探试验,试验得到的比贯入阻力 p_s 随深度 s 的变化曲线如图 6 所示。

由图 6 可知,2 个试验点在 3 m 深度范围内呈现出相同的变化规律。表层土体的 p_s 较大,约为 0.36 MPa,随深度增加逐渐减小,到 1 m 深度处仅有 0.04 MPa。随后, p_s 开始增大,在 1.5 m 深度附近达到 0.28 MPa,2~3 m 深度范围内 p_s 增长较小,3 m 深以下 p_s 增大最明显,达到 1.13 MPa。由此可知,土体沿深度方向加固并不均匀,上部土体由于真空预压作用明显,加固效果较好,3 m 以下吹填淤泥由于导电塑料排

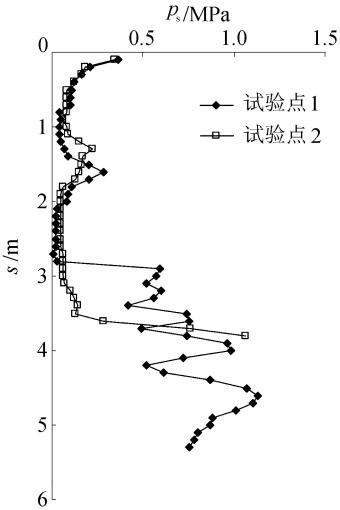


图 6 p_s 随 s 变化曲线

Fig. 6 p_s - s curve

水板的电渗作用及向上排水作用,强度也得到明显提高,而 2~3 m 深度范围内的土体可能由于排水通道不畅,水大量淤积在此无法排出,从而造成这一深度范围内的土体 p_s 较小。

4.3.2 十字板剪切试验

现场采用电阻应变式十字板仪进行十字板剪切试验。十字板规格为 50 mm×100 mm,利用静力触探仪的贯入装置将十字板头压入到不同的试验深度,借助齿轮扭力装置旋转十字板头,用电子仪器量测土的抵抗力矩,从而计算出土的抗剪强度。加固后在试验场地内随机选取有代表性的 3 个试验点,根据测试结果得出不同点位原状土的十字板抗剪强度及扰动土十字板剪切强度随 s 变化曲线,此处仅列出其中 1 个十字板剪切试验结果,如图 7 所示。

由图 7 可知,原状土与扰动土的抗剪强度在 2 m 深度范围内随着深度的增加而增大,2 m 以下随深度增加逐渐减小。根据 3 个检测点不同深度获得的原状土及扰动土不排水抗剪强度,可以得出吹填土结构的重要参数——灵敏度 S_l 的变化范围基本在 1~4 之间,属于低灵敏或中等灵敏黏土。换算得各点的地基承载力随深度的增加而增大,浅层地基承载力较小,这与静力触探结果匹配较好。

4.3.3 平板载荷试验成果

试验结束后,在现场进行了载荷板试验。载荷板为正方形平板,面积为 0.56 m²。根据载荷板试验结果,绘制荷载值 P ~沉降量 S 关系曲线。从图 8 可以看出,加载至 55 kPa 时,曲线基本平滑,相应的沉降量为 14.77 mm,加载至 65 kPa 时,曲线斜率明显增加出现拐点,此时试验点总沉降量为 23.53 mm,得到地基承载力特征值为 55 kPa,提高幅度非常明显,可以满足施工机械进场的要求。

4.4 土工试验结果分析

为进一步检验场地处理加固效果,在场地中选取 2 个点取土进行室内试验,取样深度均为 4 m。将土体主要物理力学性质指标列于表 2,其值分别为 2 个点处测得结果的平均值。由表 2 可知,加固深度范围内的吹填土含水率降幅较大,各项物理力学性质指标也得到明显改善。处理后的土体液限、塑限较处理前的液限、塑限均有不同程度的降低,说明电渗可改变土体矿物含量和化学成分分布,因而改变了土体的界限含水率。

表 2 加固后土体物理力学性质指标

Table 2 Physico-mechanical properties of soil after consolidation

密度/ (g·cm ⁻³)	含水率/ %	渗透系数/ (cm·s ⁻¹)	液限/ %	塑限/ %	塑性 指数	压缩系数/ MPa ⁻¹	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ (°)
1.67	65	5.66×10 ⁻⁷	56.0	30.0	26	1.63	4.5	15

5 结 语

a. 抽真空和电渗时间总共历时 28 d,即可完成业主对场地需满足施工机械进场的要求。使用该导电塑料排水板进行电渗复合真空联合加固吹填土地基,不仅能够缩短工期、节省能耗、绿色环保,还能够获得理想的加固效果。

b. 真空预压期间,深层土体中真空度的传递是通过场地内的排水板实现,而导电塑料排水板作为电极,其阴、阳极都具有排水板的功能,电渗时产生由阳极向阴极的单向水流,而当真空度沿排水板传递良好时,将

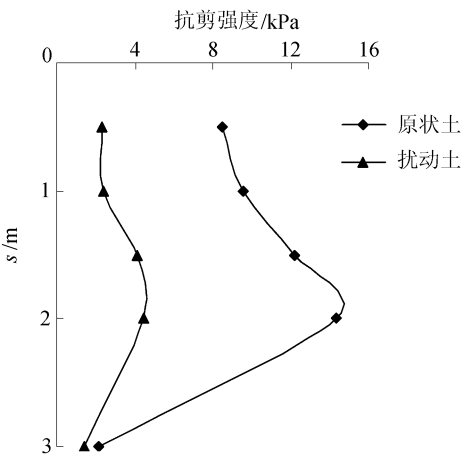


图 7 抗剪强度随深度变化曲线
Fig. 7 Variation of shear stress with depth

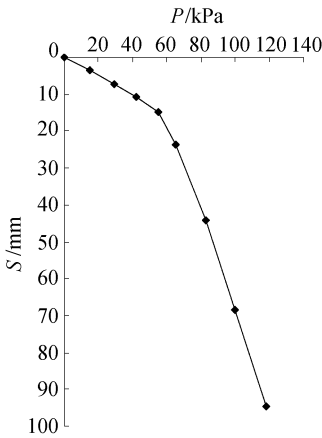


图 8 载荷板 P-S 曲线
Fig. 8 P-S curve of loading plate

会干扰电渗水流方向,降低能量利用率。通过监测发现深层淤泥中的真空度存在一个启动时间,而真空处理时间较短,因此,在试验中真空预压与电渗之间的相互干扰较少,充分结合了两者的优点。

参考文献:

- [1] 彭涛,武威,黄少康,等. 吹填淤泥的工程地质特性研究[J]. 工程勘察,1999(5): 3-7. (PENG Tao, WU Wei, HUANG Shaokang, et al. Research on engineering geologic properties of blown filled muck[J]. Geotechnical Investigation and Surveying, 1999(5): 3-7. (in Chinese))
- [2] 闫澍旺,孙立强,李伟,等. 真空加固超软土工艺的室内模型试验研究[J]. 岩土工程学报,2011,33(3): 341-347. (YAN Shuwang, SUN Liqiang, LI Wei, et al. Model tests on vacuum preloading technology of super-soft soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(3): 341-347. (in Chinese))
- [3] MITCHELL J K. Conduction phenomena: from theory to geotechnical practice[J]. Geotechnique, 1991, 41(3): 299-340.
- [4] REUSS F F. Charge-induced flow[C]//ПАЗУМОСКИЙ. Proceedings of the Imperial Society of Naturalists of Moscow. Moscow: Moscow State University, 1809: 327-344.
- [5] HELMHOLTZ H V. Studienüber electrische Grenzschichten[J]. Annalen der Physik, 1879, 243(7): 337-382.
- [6] CASAGRANDE L. Electro-osmosis in soils[J]. Geotechnique, 1949, 1(3): 159-177.
- [7] FETZER C A. Electro-osmotic stabilization of west branch dam[J]. Journal of Soil Mechanics and Foundations Div, 1967,93 (SM4): 85-106.
- [8] CASAGRANDE L, WADE N, WAKELY M, et al. Electro-osmosis projects, British Columbia, Canada[C]//BALLKEMA. Soil Mechanics and Foundation Engineering Tenth International Conference. Stockholm: Swedish National Road and Transport Research Institute, 1981: 607-610.
- [9] 曾国熙,高有潮. 软黏土的电化学加固[J]. 浙江大学学报,1956,8(1): 12-35. (ZENG Guoxi, GAO Youchao. Electric chemical strengthening of soft clay[J]. Journal of Zhejiang University, 1956, 8(1): 12-35. (in Chinese))
- [10] 王甦达,张林洪,吴华金,等. 电渗法处理过湿土填料中有关参数设计的探讨[J]. 岩土工程学报,2010,32(2): 211-215. (WANG Suda, ZHANG Linhong, WU Huajin, et al. Parameter design of over-wet soil fill treated by electro-osmosis[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(2): 211-215. (in Chinese))
- [11] SUN Zhaohua, GAO Mingjun, ZHOU Wei. Assessment of vacuum preloading of soft sediment applied to various drainage schemes[J]. Soil Mechanics and Foundation Engineering, 2014, 50(6): 255-261.
- [12] 李瑛,龚晓南,郭彪,等. 电渗软黏土电导率特性及其导电机制研究[J]. 岩石力学与工程学报,2010,29(增刊2): 4027-4032. (LI Ying, GONG Xiaonan, GUO Biao, et al. Research on conductivity characteristics of soft clay during electro-osmosis and its conductive mechanism[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(Sup2): 4027-4032. (in Chinese))
- [13] 王协群,邹维列. 电渗排水法加固湖相软粘土的试验研究[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))
- [14] 庄艳峰,邹维列,王钊,等. 一种可导电的塑料排水板:中国,CN202730745U[P]. 2013-02-13.
- [15] 朱群峰,高长胜,杨守华,等. 超软淤泥地基处理中真空度传递特性研究[J]. 岩土工程学报,2010,32(9): 1429-1433. (ZHU Qunfeng, GAO Changsheng, YANG Shouhua, et al. Transfer properties of vacuum degree in treatment of super-soft muck foundation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(9): 1429-1433. (in Chinese))
- [16] 董志良,张功新,周琦,等. 天津滨海新区吹填造陆浅层超软土加固技术研发及应用[J]. 岩石力学与工程学报,2011, 30(5): 1073-1080. (DONG Zhiliang, ZHANG Gongxin, ZHOU Qi, et al. Research and application of improvement technology of shallow ultra-soft soil formed by hydraulic reclamation in Tianjin Binhai new area[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(5): 1073-1080. (in Chinese))