

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2019.02.008

EKG 电极的电渗现场试验研究

刘志涛, 庄艳峰, 黄运兰, 柳菲菲, 邹维列, 李子优

(武汉大学 土木建筑工程学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 基于电渗法处理软土研究多为室内模型试验研究, 缺乏现场试验验证电渗法的有效性。引入新型电动土工合成材料(EKG)电极, 采用电渗排水法进行大规模的现场软土处理试验, 验证电渗排水法在实际应用中对软土的处理效果, 同时验证新型电极的可靠性。结果表明: 反转电极有利于促进电渗排水, 间歇通电能让土体恢复排水能力; 电渗处理后的软土含水率由 62% 降至 32%, 抗剪强度、干密度、承载力都有一定提高; EKG 电极在使用一个月后基本无腐蚀现象, 只是表面附着一层白色沉淀物, 很好地解决了电极腐蚀问题。

关键词: 电动土工合成材料; 电渗; 软土处理; 电极腐蚀

中图分类号: TU447

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2019)02-0046-06

Field Test on Electroosmosis Using EKG Electrode

LIU Zhitao, ZHUANG Yanfeng, HUANG Yunlan, LIU Feifei, ZOU Weilie, LI Ziyou

(School of Civil Engineering, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China)

Abstract: The study of soft soil treatment based on electroosmosis is mostly indoor model test, which is lack of field test to verify the effectiveness of electroosmosis. A new type of Electro-kinetic geosynthetics (EKG) was introduced and electroosmotic drainage method was used to treat the soft soil on site in a large scale. The effects of the electroosmotic drainage method on the soft soil were verified in the practical test and the reliability of the new electrode was tested. The results show that the method of reversing the electrode is beneficial to promote the electroosmotic drainage and intermittent energization and can restore soil drainage capacity. The moisture content of the soft soil after electroosmosis treatment decreased from 62% to 32%, and the shear strength, dry density and bearing capacity are improved. EKG was not corroded after one month of use, only white sediments adhere to the surface, which solves the problem of electrode corrosion well.

Keywords: electro-kinetic geosynthetics (EKG); electroosmosis; soft soil treatment; electrode corrosion

近几十年,随着经济的发展,可继续开发的土地越来越少,特别是经济高度发达的沿海城市,各国开始大力发展围海造陆工程。而造陆所用材料多为吹填淤泥土,要使其变成一块可使用的土地,必须对吹填淤泥土进行固结。此外,在许多天然土体中经常夹有软弱土层,这些土层具有高含水率、高压缩性、承载能力低等特点,直接在这种土层的地基上建造构筑物,会造成地基沉降过大或沉降差过大,影响上部建筑物的结构安全,易引发工程事故,需事先对土

体进行处理。常用的软土处理方法是排水固结法,比如真空预压法、井点法、堆载法等,但这些方法都存在一定的局限性。例如真空预压法,是现在比较常用的一种排水固结法,有较好的排水固结效果,但是它存在对边界条件要求高,后期加固效果较差等缺点,在工程应用中受到一定限制。电渗排水法是一种有效的软土加固方法^[1],多用于处理软黏土和淤泥质土。

电渗排水法是在土中插入电极并施加电压,孔

收稿日期:2018-10-24

修稿日期:2018-12-04

基金项目:国家自然科学基金项目(41472039,51109168)

作者简介:刘志涛(1994—),男,江西九江人,硕士研究生,研究方向为重金属污染土修复。E-mail: zhitao - Liu@whu.edu.cn

通讯作者:庄艳峰(1978—),男,福建永泰人,副教授,博导,主要从事岩土工程和环境工程的教学与科研工作。E-mail: zhuang@tsinghua.edu.cn

隙水中的离子在电场力的作用下定向运动并带动水分子的移动,随着土中水的排出,土体逐渐产生固结。电渗排水法对渗透系数很低的土($k_h < 10^{-6}$ cm/s $\sim 10^{-7}$ cm/s)加固效果较好^[2],相比预压法,电渗排水法有排水速率快、噪音小等优点,还可以在在一定程度上治理污染的土体。电渗法为高含水率、低渗透性的岩土材料的脱水处理提供了新的可行方法。但是电极腐蚀问题一直限制了电渗法的发展,直到电动土工合成材料^[3-4]的出现才较好地解决了这一问题。

电渗理论经过多年的研究取得了丰富的成果。最早在 1897 年, Helmholtz 提出了双电层模型,并于 1914 年由 Smoluchowski 加以修正^[5],该模型认为黏土颗粒带负电荷,并在土颗粒表面形成双电层结构,同时分析了扩散层中的离子分布规律。这个理论是最早用于描述电渗过程的理论之一,一直广泛被接受。1953 年,汪闻韶^[6]对电渗降水和加固进行研究,提出电渗和水力渗透混合流公式,并阐述电渗加固机理。1968 年, Esrig^[7]基于一系列的假定建立了电渗一维固结理论,认为土中水的运移是电势梯度和负孔隙压引起的反向水力梯度共同作用的结果,推导出孔隙水压力与施加电压的关系式,并给出四种边界条件下的解析解。1976 年, Wan 等^[8]继承和完善了 Esrig 的电渗理论,分析电渗与堆载联合作用下的固结,并给出一维解答。1998 年, Shang^[9]推导出

电渗与堆载联合作用下的二维解析式,并与纯电渗进行对比分析。2004 年, Su 等^[10]利用分块处理方法建立了二维固结理论。以上所有的固结理论均是 Esrig 的电渗理论的延伸和发展。Esrig 的电渗理论是在饱和土力学的基础上建立的,但往往电渗中后期土体已不再处于饱和状态,另外忽略了电渗过程中电学参数的分析。2004 年—2005 年,庄艳峰等^[11]从电学的角度提出能级梯度理论和电荷累积理论^[12],并用能量法^[13]对电渗的固结过程进行较详细的分析,从而取消了 Esrig 理论中“电渗过程总土体处于饱和状态”这一隐含假定,并给出了电渗过程中各种电学参数的分布及变化情况。但是对于基于现场的试验研究,相对来说可以参考的数据较少,而且现场试验更能验证电渗排水法的有效性。所以本文引入新型的电动土工合成材料(EKG)^[3]进行大型的现场试验,该现场试验在之前的论文^[14-15]中已经进行部分分析,本次主要针对试验的过程、数据来源以及具体数据进行更详细的分析,通过各项物理力学指标来说明电渗法对软土的处理效果同时验证新型电极的可靠性。

1 现场试验概况

1.1 试验土样

试验土样选取江苏省江阴市华宏村池塘附近的淤泥,现场原状土的性质见表 1。

表 1 原状土的物理力学性质

含水率 /%	孔隙比	比重	渗透系数 / (cm·s ⁻¹)	塑限 /%	液限 /%	黏聚力 /kPa	摩擦角 / (°)
62	1.5	2.61	3×10^{-7}	22	50	0.988	26.5

1.2 试验场地布置

试验场地位于江苏省江阴市华宏村。场地处理范围长 20 m,宽 16 m,淤泥土层厚度为 5.8 m。场地的北面是一个小池塘,西面距离场地边缘 10 m 处有一条公路,东面和南面均是菜地,见图 1。由于场地上待处理淤泥的含水率过高,土体承载力几乎为零,于是在淤泥上铺一层厚约 30 cm 的普通黏土,以便进行插板、连接电线等操作。电极长度为 6 m 左右,垂直插入待处理的土体中。电极按矩形排布,同性电极和异性电极之间的间距均为 1 m,电极个数为 16×20 共 320 个,四周外沿各留出半米,具体布置详见图 2。将电极板布置完毕,在场地四周挖出排水沟,场地中间也挖出纵横两条排水沟,场地中间的两

条排水沟铺上碎石至地面高度,作为排水通道,并在整个场地均匀铺上 50 mm 厚的细砂,作为排水层将电极板排上来的水引至排水沟,现场布置情况如图 3 所示^[14]。

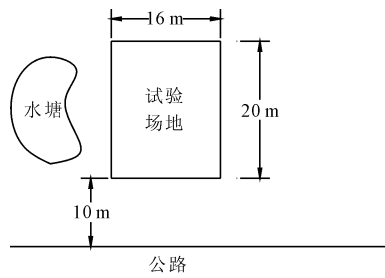


图 1 试验场地的位置

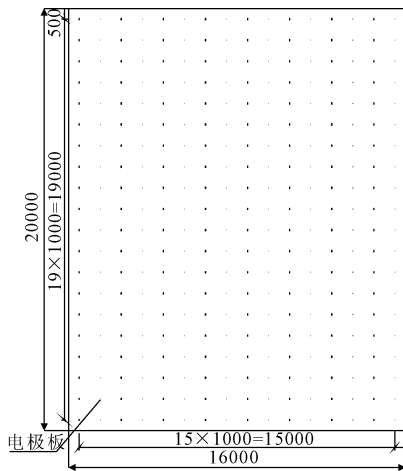


图 2 现场电极布置图

上述操作完成后,再用电线将电极板连接起来,将同一排的 20 个电极板串联,共 16 排。相隔一排的电极极性相同,相邻的电极极性相反,图中竖线代表的电极板作为初始阳极,每一排并联接到电源的正极上;而图 2 中加号代表电极板作为初始阴极,同样每一排并联接到电源的负极上。

现场试验中共使用了两台电源,分别是 WYK80V/2000A - RS 直流稳压电源和 100V/300A - RS 自控直流电源。电源上装有自动转换电流输出方向的按钮,并带有远程控制程序,可在电脑上用软件对电源进行控制。

(a) 插入电极板^[14]

(b) 铺砂层/设排水沟

图 3 插入电极板后的场地

1.3 现场监测点位布置

整个现场试验中监测了电流、电压和沉降。电流和电压主要通过电源上的显示器或电脑的远程控制程序读取;沉降通过在场地上布置监测点,每隔一段时间用水准仪读取每个监测点的标高,共布置 9 个沉降监测点,具体位置见图 4。

试验软土电渗处理后,采用薄壁取土器取 I 级原状土样。试验场地内共布置 5 个钻孔,依次标号为 1#、2#、3#、4# 和 5#,具体位置见图 5。

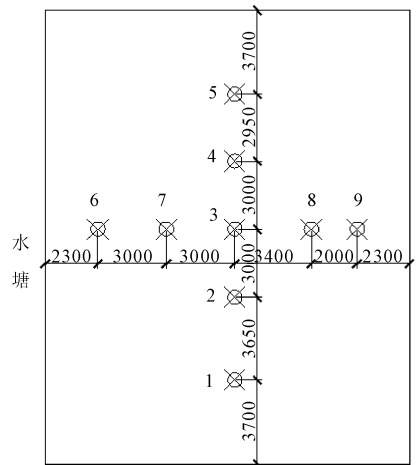


图 4 沉降监测点布置位置

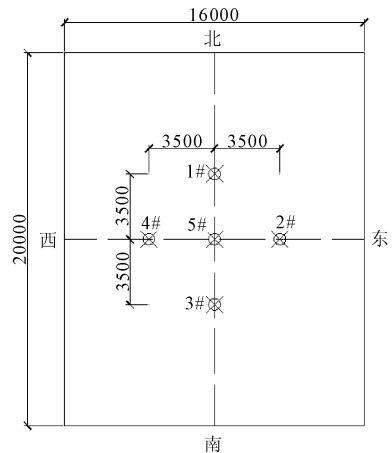


图 5 取样点布置位置

取出钻孔原状土样后,将钻孔土样沿深度方向进行分段并对原状土样进行一系列的物理力学参数测试详见表 2。说明:各钻孔土样中,深度 0.4 m ~ 0.6 m 范围均为地基顶层的人工填土及排水砂垫层,并非原地基土,故取样时不取该部分土样,以场地表面为坐标原点,每个钻孔沿竖向共取 4 个点。

表 2 各土样所对应实验项目

土层 深度/m	不同钻孔对应实验				
	1#	2#	3#	4#	5#
1.5	不固结快剪	不固结快剪	固结快剪	压缩	压缩、渗透
2.5	不固结快剪	压缩	固结快剪	不固结快剪	压缩、渗透、液塑限
3.5	不固结快剪	不固结快剪	固结快剪	压缩	压缩、渗透
4.5	不固结快剪	压缩	固结快剪	不固结快剪	压缩、渗透

2 现场试验通电方案

整个试验共持续 40 d。在试验开始阶段,受限于电源功率,先采用 100V/300A 的电源通电,稳流输出 295 A。在电压过大时转成稳压模式,恒定输出电压为 50 V。然后断电一段时间,之后换成 80V/2000A 的电源,重新通电,改成稳压 80 V 输出,具体见表 3。

表 3 通电历程

电源输出状态	稳流 295A	稳压 50V	断电	稳压 80V
通电时长/h	234	29	382	215

试验期间一直采用电极转换的方式进行通电。转换方式采用之前课题组室内试验结果,设定为不对称转换,即:先进行每 10 min 转换通电几个周期,可以观察到反向电流会有一个维持稳定的时段,待反向电流开始下降后,转成正向通电,正向电流很快衰减,达到一定数值后下降速度明显减缓,选择正向电流减缓的时间作为正向通电时间。然后按照试出的这个时间作为转换频率。总的来说,小功率电源通电采用长时间反向 + 短时间正向的通电模式,间歇一段时间后,转为大功率电源通电,改为长时间正向 + 短时间反向的通电模式。

3 现场试验结果与分析

3.1 稳流阶段电压变化

在这个阶段以稳流 295 A 输出。场地上总共 16 个回路,每个回路的电流约为 18.4 A,电流密度为 0.17 A/m²。电流是决定排水速率的关键因素,而在稳流输出的情况下,电压越小,就越节能。

先进行 10 min + 10 min 的通电后,发现反向电压变化幅度较小,更稳定,这与室内模型试验的结果一样。于是延长反向通电的时间,待电压出现增大趋势后转换电极,直至正向电压增大的趋势减缓再将通电方向转成反向。根据电压变化在转向反向通电的一瞬间,电压值小于转换前的值,随后电压在很短的时间内下降至一个较低的值,并维持一段时间的稳定,最后再缓慢增大。在从反向转回正向的一瞬间,电压值同样小于转换前的值,但很快电压就超过了转换前的值,升高到一个较高的值后变化速度减慢或者维持不变。

根据转换调试的结果,得出一个较适合的转换周期为 2 h + 14 h,这个周期约为模型试验结果的 13

倍。

最开始电压不高于 20 V,在通电的前 200 h,反向电压的变化幅度很小,基本维持在 20 V 左右。在这个时间段,正向电压的峰值是缓慢增大。但是在 200 h 后,两个方向的电压均急速升高,在 30 h 后电压峰值超过了 80 V,这时的通电形势很差,电压很快就要超过量程,如果不改变通电方式就只能被迫停止通电,所以后续将通电方式改成稳压 50 V。

3.2 稳压 80 V 阶段电流变化

结束稳流 295 A 和稳压 50 V 这两个阶段后,断电一段时间,再继续通电。将输出方式改成稳压输出,在输出电压一定的情况下,电流越大,对排水越有利。正向电流大于反向电流,说明延长正向时间更有利。正向电流可分为两个阶段:下降阶段和上升阶段。

在转向正向的一瞬间,电流值远大于转换前的值,在短时间内快速下降,但下降幅度较小。上升阶段,正向电流短暂地下降后,逐渐升高,在通电几个周期后,约 80 h 时达到了初始电流的 4 倍。80 h 后,考虑到线路的承受极限问题,将电压降至 60 V,在接下来的一个周期内,电流下降了 0.15 kA,但电流仍然存在一个上升的过程;而在转向反向的一瞬间同样电流值变大,但在快速线性下降至一个很低值后,改变输出电压,对反向电流的影响不明显。

这个阶段能看到明显的排水,排水量也明显多于稳流阶段,这主要归结于电流值变大的原因。间歇一段时间后,土体原本已难以排水的情况得到了改善,排水能力得到了进一步的提高,这说明间歇后,土体里由于电渗产生的电荷累积消散了,pH 值的不平衡也慢慢被中和了,同时阳极附近土体被毛细作用重新润湿,界面电阻降低,土体的电渗能力得到了恢复。

在通电 120 h 后,反向电流的变化规律不变,但正向电流不再出现上升的趋势,在转向瞬间快速下降后缓慢减小。说明在通电 120 h 后,稳流阶段长时间反向通电产生的阻碍作用已经被现阶段长时间正向通电完全抵消。继续长时间正向通电,电渗的阻碍作用会越来越大,电流开始逐渐衰减。

3.3 电渗前后土体性质的变化

通电结束后,根据表 2 进行取样并测定了几种指标,主要是:含水率、密度、抗剪强度、压缩指数和水力渗透系数等。所有指标的测定均按照《公路土工试验规程》^[16](JTG E40—2007)进行。

(1) 含水率与密度。土样的含水率与密度测量

结果见表 4, 经过一个多月的电渗处理后, 土体的含水率有大幅度的降低, 降低了初始含水率的一半左右, 土体密度也在一定程度上提高了。从深度分布上看, 表层土体含水率较低, 干密度较大, 说明处理效果较好; 同时含水率并不是随着深度逐渐递增的趋势, 最大的位置不是出现在土层最深处, 而是在中下部, 但从整体上看差别并不大。总的来说, 电渗排水固结使土体的平均含水量从 62% 降低到 36%。

表 4 电渗前后土体含水率与密度

取土深度 /m	平均含水率 /%	湿密度 /($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	干密度 /($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)
初始值	62	1.66	1.03
1.2~1.5	32	1.93	1.44
2.2~2.5	36	1.86	1.34
3.2~3.5	42	1.82	1.27
4.2~4.5	34	1.87	1.36

(2) 强度。电渗前后的淤泥土均采用不固结不排水试验方法对土体进行抗剪强度的测定, 不同含水率下土体的 C_{un} 值见表 5。并对电渗处理后的淤泥土进行现场十字板剪切试验, 实验结果见表 6。

表 5 不同含水率下土体的 C_{un} 值

含水率 /%	30	35	40	42	45
C_{un}/kPa	17.4	13.3	9.2	7.0	5.0

表 6 十字板剪切试验结果

样本数	$C_u(\text{现场})/\text{kPa}$	$C_u(\text{室内})/\text{kPa}$	S_t
20	25.45	15.37	1.99

与现场十字板剪切试验相比, 室内快剪实验得到的抗剪强度较小, 这可能是由于快剪实验的土样发生了扰动。综合现场十字板剪切试验和室内快剪试验的结果, 经过电渗之后土体从之前没有粘聚力的流塑状态提高到不固结不排水抗剪强度为 20 kPa 左右的可塑状态。

(3) 压缩系数。将表 2 中的 5# 土样进行固结实验, 得到各种荷载下的压缩系数, 采用压力段由 100 kPa 增加到 200 kPa 时的压缩系数来比较不同深度土层的压缩性, 并评定处理后土的压缩性。结果如表 7 所示。

表 7 电渗前后土体的压缩系数

深度/m	电渗前	1.2~1.5	2.2~2.5	3.2~3.5	4.2~4.5
a_v/kPa^{-1}	1.163	0.37	0.64	0.61	0.93

从试验数据看, 处理后的土体的压缩系数有了

大幅度的降低。而随着深度的增加, 压缩系数是随之增加的。这很可能是含水率的不同造成的, 含水率越高, 土的压缩系数就越大, 而含水率随深度的变化规律恰好与之相同。从平均水平看, 电渗后土的压缩系数约为 0.6, 仍处于高压缩性土的范畴, 但已经很接近中压缩性土了, 这也体现出了处理的成效。

(4) 承载力。现场静力触探试验成果如表 8 所示。

表 8 静力触探结果

编号	C1	C2	C3	C4
测试深度/m	6.0	5.9	5.9	5.6
p_s 范围值/kPa	250~720	220~1090	120~410	140~390
p_s 平均值/kPa	440	480	210	180

根据静力触探确定黏性土承载力特征值 f_{ak} 的经验公式^[17]: $f_{ak} = 0.085p_s + 43$, 估算出 $f_{ak} = 58.3 \sim 83.8$ kPa, 平均为 71 kPa。

3.4 试验能耗

根据输出的电流、电源和通电的时间计算出每个过程的耗电量, 结果如下表 9。

表 9 现场试验耗电量

电源输出状态	稳流 294 A	稳压 50 V	断电	稳压 80 V
耗电量/(kw·h)	1972.5	178.29	—	7046.2
总耗电量/(kw·h)	9197			

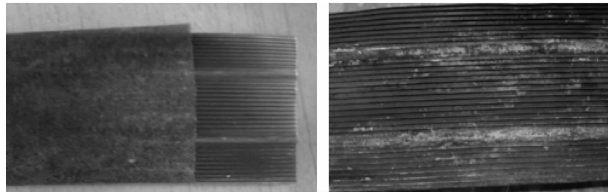
在使用小电源通电的阶段, 总耗电 2 151 kw·h, 平均沉降 2.5 cm ~ 4 cm, 而在大电源通电阶段, 总耗电 7 046 kw·h, 平均沉降 12.5 cm ~ 16 cm。大电源通电阶段能耗比小电源通电阶段多 2.3 倍, 沉降多 3 倍 ~ 4 倍, 总体上说, 大电源通电阶段的处理效率更高。

这是根据输出情况估算的能耗, 而实际中还会存在别的损耗, 比如电缆的损耗和电源的损耗等, 所以总的能耗值会比计算值 9 197 kw·h 多一些。平均单位排水能耗为 17.8 kw·h/m³, 而处理单位体积土体的所需能耗仅为 5.6 kw·h/m³。

3.5 试验后电极板变化

电渗结束之后, 将 EKG 电极板挖出冲洗后, 照片如图 6(b) 所示。对比电渗前的电极板图 6(a) 可以看出, 电渗之后电极未被腐蚀, 电极表面附着有白色物质, 推测可能为盐类沉淀物。李瑛^[18]在采用金属电极进行电渗试验时同样发现随着电渗的进行, 阴极设置的反滤土工布表面逐渐积累了一些白色难溶物。说明这并不是电极的析出物, 而是两极的化学反应的产物。通电结束后电极仍保持完好, 说明

这种 EKG 电极很好地解决了电极腐蚀的问题。



(a) 电渗前

(b) 电渗后

图6 电渗结束前后的 EKG 材料电极板照片

4 结 论

(1) 在通电的前期,反向电压较稳定,延长反向通电时间更有利,这个特性与模型试验结果相同;而经过一段时间的间歇后,原本难以排水的土体继续排水,而且排水情况比间歇之前更好,这时反倒是正向电流在持续上升,反向电流衰减很快,延长正向通电时间有利。说明间歇通电能让土体恢复排水能力。

(2) 电渗结束后,土体含水率从最初的 62% 降至 36%,土体含水率明显下降;土体的抗剪强度明显地提高,根据现场静力触探试验的结果,最终土体承载力达到了 71 kPa,土体承载力明显地提高;土体的压缩系数随着深度的增大而增大,主要受含水率分布的影响,但总体上都有明显地降低。电渗法对软土体处理效果明显,土体的各项物理力学指标都明显变好。

(3) EKG 电极在使用后基本无腐蚀现象,说明这种电极在取得较好的电渗效果同时,也很好地解决了电极腐蚀问题。

参考文献:

[1] 韩舰辉,王宁伟,白小航,等.海相软黏土电化学改性固结试验研究[J].水利与建筑工程学报,2014,12(4):9-13.

[2] 万 勇.大连海相淤泥电渗固结试验研究[D].大连:大连理工大学,2014.

[3] 庄艳峰,邹维列,王 钊,等.一种可导电的塑料排水

板:中国,201210197981.4[P].2012-10-10.

[4] 王宁伟,孙守刚,梁家豪,等.非金属电极在电渗排水中的应用[J].水利与建筑工程学报,2016,14(4):59-63.

[5] Gray D H, Mitchell J K. Fundamental aspects of electro-osmosis in soils[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1967,93(6):209-236.

[6] 汪闻韶.土工问题论文选集[M].北京:中国建筑工业出版社,1996.

[7] Esrig M I. Pore pressures, consolidation, and electrokinetics [J]. Journal of the Soil Mechanics and foundations Division, 1968,94(4):899-921.

[8] Wan T Y, Mitchell J K. Electroosmotic consolidation of soils [J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1976, 102(5):473-491.

[9] Shang J Q. Electro-osmosis enhanced preloading consolidation via vertical drains[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1998, 35(3):491-499.

[10] Su J Q, Wang Z. Theory of two-dimensional electro-osmotic consolidation of soils[J]. Rock and soil mechanics, 2004, 25(1):125-131.

[11] 庄艳峰,王 钊.电渗的电荷累积理论[J].岩土力学, 2005,26(4):629-632.

[12] 庄艳峰,王 钊.电渗的能级梯度理论[J].哈尔滨工业大学学报,2005,37(2):283-286.

[13] 庄艳峰. EKG 材料的研制及其在边坡加固中的应用 [D].武汉:武汉大学,2005.

[14] Zhuang Y F. Electro - kinetic geosynthetics (EKG) and electro-osmosis theory[J]. IGS News, 2015,31(1):10-14.

[15] Zhuang Y F, Huang Y, Liu F, et al. Case study on hydraulic reclaimed sludge consolidation using electrokinetic geosynthetics [C]//10th International Conference on Geosynthetics. Berlin: DGGT, 2014, CD-ROM.

[16] 公路土工试验规程:JTG E40—2007[S].北京:人民交通出版社,2007.

[17] 肖 兵,赵沐华.静力触探预估地基土承载力经验公式[J].中外公路,2012,32(2):4-6.

[18] 李 瑛.软黏土地基电渗固结试验和理论研究[D].杭州:浙江大学,2011.