

间歇通电模式影响电渗效果的试验

陶燕丽^{1,2}, 周建², 龚晓南², 陈卓²

(1 天津市软土特性与工程环境重点实验室, 300384 天津; 2. 浙江大学 滨海和城市岩土工程研究中心, 310058 杭州)

摘要: 为了研究间歇通电模式对电渗加固效果的影响, 采用实验室一维模型箱, 在不同通断模式下开展电渗试验. 试验分两个阶段, 第一阶段固定通断时间比, 研究不同通电周期对电渗的影响, 同时与连续通电对比; 第二阶段, 固定通电周期, 研究通断时间比对电渗的影响. 测量试验过程中的电流、阴极排水量, 试验结束时的抗剪强度以及含水量分布, 并给出不同组试验的阳极板腐蚀图. 结果表明: 间歇通电能否有效以及通电周期和通断比对电渗效果的影响会因试验时间的不同而存在差异; 采用适当的通电周期和通断时间比, 间歇通电可以减缓电极腐蚀, 提高电渗效果. 文章最后对已有文献中的分歧作出了解释, 并指出电渗法实际工程应用中, 建议通电周期选取 1~4 h, 通断时间比取 2.0.

关键词: 间歇通电; 电渗效果; 通电周期; 通断时间比

中图分类号: TU447

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2014)08-0078-06

Experimental research of the influence of current intermittence on electro-osmotic effect

TAO Yanli^{1,2}, ZHOU Jian², GONG Xiaonan², CHEN Zhuo²

(1. Tianjin Key Laboratory of Soft Soil Characteristics and Engineering Environment, 300384 Tianjin, China;
2. Research Center of Coastal and Urban Geotechnical Engineering, Zhejiang University, 310058 Hangzhou, China)

Abstract: Series of one-dimensional electro-osmotic laboratory tests were conducted in a self-made tank to investigate the impact of current intermittence on electro-osmotic effect. The tests were divided into two stages. In the first stage, time ratio of power on and off was fixed to study the effects of different power on periods, which were also compared with the result of continuous conduction. In the second stage, the power on period was fixed to study how different time ratios of power on and off affect electro-osmotic process. Currents and drainages were monitored every certain time during the test, while the distributions of shear strength, water content were measured after the test. The results suggest that the testing time possesses key influence on the effectiveness of current intermittence and the distinction of electro-osmotic effects obtained. With appropriate power on period and time ratio, current intermittence can result in lighter electrode corrosion and enhance electro-osmosis efficiency excessively. Finally, reasonable explanations of the different results in existing literature were given, and it is recommended to employ current intermittence for engineering application of the electro-osmosis technique, with the optimal power on period and time ratio of power on and off being 1-4 h and 2.0 respectively.

Keywords: current intermittence; electro-osmosis effect; power on period; time ratio of power on and off

电渗法排水速率与土颗粒大小无关, 被认为是处理低渗透性软土地基较为有效的方法. 1939

年 Cassagrande^[1]首次将电渗法成功应用于土木工程, 随后各国学者对其展开了较多研究^[2-5], 但电渗法始终没有成为主流的地基处理方法, 原因在于本身存在诸多不足: 电势损失大、电极腐蚀严重、能耗高、效果不理想等. 如何克服不足之处, 改善处理效果, 是现阶段电渗法研究亟需解决的关键问题.

收稿日期: 2013-07-18.

基金项目: 天津市软土特性与工程环境重点实验室开放基金资助项目(2011SCEEKL004).

作者简介: 陶燕丽(1989—), 女, 博士研究生;

龚晓南(1944—), 男, 教授, 博士生导师.

通信作者: 周建, dzhoujian@yahoo.com.

间歇通电被认为是改善电渗效果容易实现的手段之一,只需在电路中串联一个循环电流控制器控制电流通断,因此备受关注.然而,关于该技术的有效性,已有文献报道并不一致^[6-10].这固然有试验土质、模型尺寸差异等原因,而更多的是因为采用的通断电时间不一致.通断时间主要从两方面来控制:通电周期和通断时间比.通电周期指的是一个通断循环的通电时间,国内倾向于较长周期,时间以小时计^[10-11];而国外倾向于较短周期^[3-4,12-13].另一个变量——通断时间比,是通电和断电时间的比值,也有学者在不同通断比下进行对比试验,以获得最优的通断比^[3,8].然而,已有研究多针对短周期的电渗试验,尚缺乏长短周期电渗效果的比较,且已有研究成果无法给实际工程中间歇通电模式的选取提供全面指导.另外还需指出的是,不管是电渗法工程应用实例还是大面积的场地试验,电压多非连续施加,而是间歇性地通电,如文献[14]采用电渗法加固粘土地基,文献[15]处理上海铁道学院的人防沉井,文献[16]在现场试验中采用间歇通电技术.长时间的电渗处理中采用间歇通电技术不仅有电渗效果的考虑,也有施工工序的影响,本文将在讨论部分对此进行详细叙述.由此可见,研究不同间歇通电模式对电渗效果的影响不仅具有理论意义,也具有较高的实际工程价值.

基于此,作者在不同通电周期和通断时间比下开展多组电渗试验,从排水量、含水量、抗剪强度以及电极腐蚀角度比较了通断电模式对电渗效果的影响,以探究间歇通电技术的有效性,评述各种通断模式对电渗加固效果的影响,最终基于试验结果提出最优的通断电模式,以期电渗法工程应用提供试验指导.

1 试验设计

1.1 试样制备

试验土样取自杭州三墩某基坑工程,原状土性质见表 1.参照已有文献中试验土样含水量数据:文献[4] 100%~120%,文献[17] 120%,文献[18] 80%,本试验初始试样的目标含水量约为 100%.制备试样时,将适量水与土倒入大型土样容器中拌合,用搅拌器搅拌均匀,所制备的重塑土样含水量为 105%.并密封静置 24 h 以上.

表 1 原状土的基本物理指标

$w/\%$	G_s	e	$S_r/\%$	$w_L/\%$	$w_p/\%$
58.3	2.75	1.76	91.9	45.4	24

1.2 试验装置

试验电路见图 1,由直流电源(GW SPD-3606)、循环电流控制器(军达科技 JXH-1 型)、模型盒、板式电极等组成.

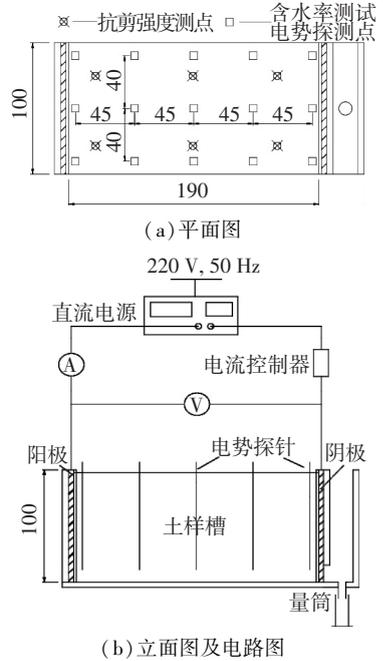


图 1 电渗试验装置(mm)

1.3 试验时间

时间控制条件的确定是间歇通电对比试验的关键.由于以通电时间作为控制条件的试验结果也能反映试验时间(包括通电和断电时间)一致时的规律,本试验保证所有试验组通电时间一致.其中,通电时间由连续通电组的试验结果确定,排水速率连续 3 h 小于总排水量的 2%时停止通电,最终确定通电时间 36 h.

1.4 试验方案

研究间歇通电的关键问题是通电、断电时间的分配,试验方案的制定也是围绕不同通断电模式展开.首先,定义通断比 β 为

$$\beta = \frac{t_{\text{on}}}{t_{\text{off}}}$$

式中: t_{on} 为通电时间, t_{off} 为断电时间.

通断模式由通电周期和通断时间比两个因素控制.因此,整个试验过程分为两阶段.第一阶段,研究不同通电周期的电渗效果,并与连续通电进行对比,见表 2,验证间歇通电技术的有效性,并给出通电周期对电渗的影响.通电周期作为试验变量时,各对比试验组的通断比 β 一致.参考文献[4,8,10,12]等,设定这一阶段各试验组通断比为 2:1,即 β 为 2.

基于第一阶段试验结果确定第二阶段试验通电周期.后面亦有提到,第一阶段试验结果表明,

通电周期越短,电渗效果越好,因此第二阶段设置通电周期较短为 5 min,以得到对比更为明显的结果.在第二阶段,各组试验通电周期一致,以通断比 β 作为变量,通过对比各试验结果,确定最优的 β 值.

表 2 第一阶段试验条件

试验组	试验类型(on/off)	试验时间/h
T1	连续通电	36
T2	12 h/6 h	54
T3	2 h/1 h	54
T4	20 min/10 min	54

表 3 第二阶段试验条件

试验组	β	试验类型(on/off)	试验时间/h
T5	10	5 min/30 s	36.9
T6	2	5 min/2.5 min	54.0
T7	1	5 min/5 min	72.0

2 试验结果及分析

参考文献[8,10]等对间歇通电试验结果的描述,以下从排水量,试验结束时含水量分布,抗剪强度分布,电极腐蚀等角度对试验结果进行分析.

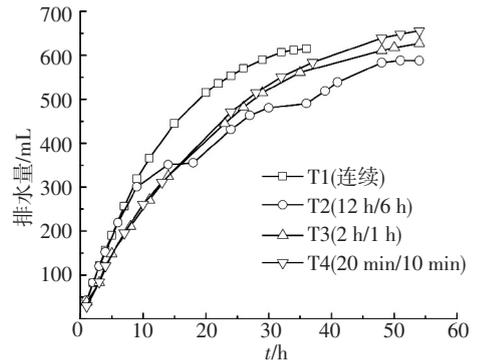
2.1 电渗排水量

排水量是衡量电渗效果最直观的指标,图 2 给出了不同组试验排水量随时间的变化.

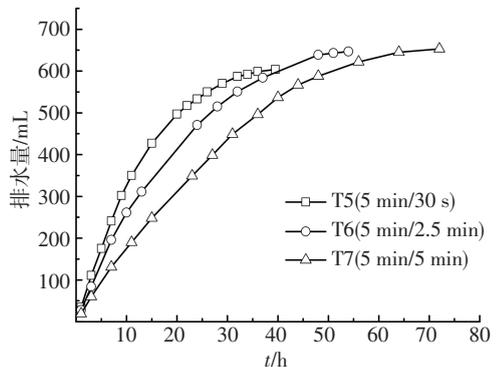
图 2(a)中,排水量 T1~T4 依次为:605、582、627、649 mL. T4 组的排水量最大, T3 次之, T2 最小,说明通电周期越短,排水效果越好,长周期的排水效果不如短周期.在 36 h,也就是常规组试验终止时,间歇通电组排水量均小于连续通电,这一现象与文献[8]的结论一致,其后,间歇通电组曲线仍呈上升趋势,而连续通电组趋向平缓,虽然 T1 组 36 h 后不再通电,但从图中曲线走势也可推想,若保证处理时间一致,试验后期,连续通电组 T1 的效果亦会不如 T3 和 T4 组.再比较 T1 和 T2,可以看到,两曲线初始非常接近,第一次断电后 T2 组效率明显下降,导致其最终排水量不如其他 3 组试验,这说明长周期间歇通电会降低电渗效率.由此可见,处理时间较短时,间歇通电的效果不如连续通电,只有在处理时间较长时,短周期间歇通电的优势才会逐渐显示出来,太长周期间歇通电不利于电渗.也就是说,处理时间不受限制时,选取较短的通电周期,间歇通电所能达到的处理效果优于连续通电.

图 2(b)是基于相同通电时间得到的试验结

果.从各曲线走势可推知,处理时间较短时,通断比越大,电渗效果越好,随着处理时间的延长,通断比较小的试验能达到更好的电渗效果.另外, T6 和 T7 最终排水量大致相同,约 650 mL,其通断比分别为 1 和 2,表明在较小的通断比下,电渗效果的差异并不明显.因此,处理时间不受限制时,选取较小的通断比,间歇通电可达到更好的处理效果.



(a) 不同通电周期



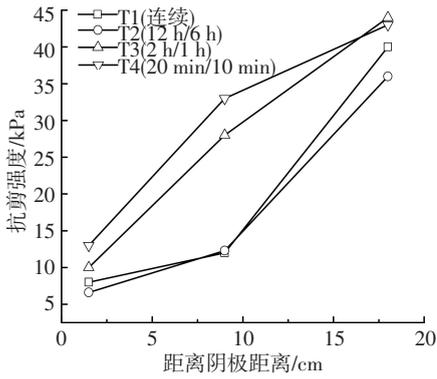
(b) 不同通断比

图 2 排水量随时间的变化曲线

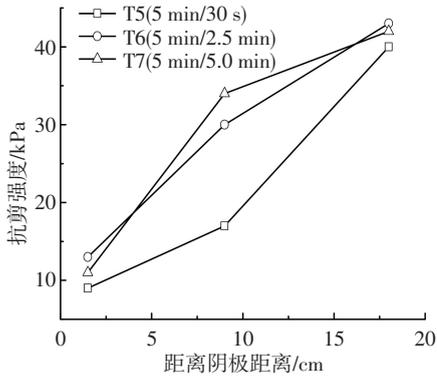
从图 1 还可看到,各试验断电期间阴极继续排水,并会持续一段时间,其中 T2 组最为明显.在断电的 6 h 内, T2 试验前 2 h 排水量不断增加,但排水速率逐渐减小,2 h 末停止排水,直至再次通电,这些使得 T2 曲线不平滑,也表明 6 h 的断电时间过长.由此可见,电渗期间停止通电水仍能继续排出,可以认为间歇通电延长了排水时间,使得适当周期和通断比的间歇通电排水效果要优于连续通电.

2.2 抗剪强度分布

试验结束时,进行抗剪强度测试.采用微型十字板剪切仪作为测量仪器(型号 PS-VST-M,测试范围 0~100 kPa,十字板头尺寸 $\Phi 25$ mm,测试精度大于 5%),分三层取样,每层取样点见图 1(a),然后对各截面所测数据取平均值作为该截面的抗剪强度值,得到土体抗剪强度分布曲线见图 3.



(a) 不同通电周期



(b) 不同通断比值

图 3 电渗后土体抗剪强度分布

由图 3 可知, T1~T7 组, 抗剪强度分布都从阳极到阴极逐渐递减. 不同组抗剪强度分布的差异体现在土体中间部分, 而阴阳极附近土体抗剪强度差别较小. 在图 3(a) 中, T4 组的整体效果最好, T3 组次之, T1 和 T2 组效果差别不大; 在图 3(b) 中, 除了 T5 组效果稍差, T6、T7 组区别并不明显. 抗剪强度反映出的各组试验电渗效果差异也有力地佐证了上述排水量分析结果.

2.3 含水量分布

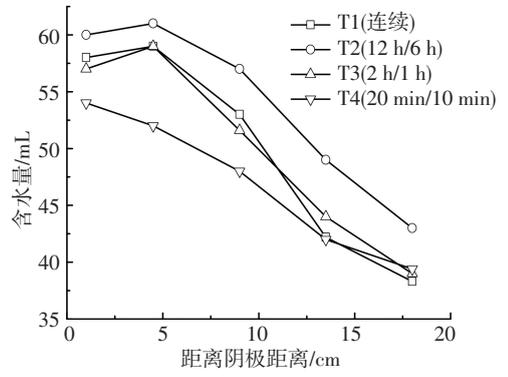
为了探究电渗对土体含水量的影响, 试验结束时, 沿着土样长度方向在图 1(b) 所示位置分 5 个截面进行含水量测试, 每个截面有 3 个测点, 取 3 个测点位置的平均值作为该截面的含水量. 试验结果见图 4.

由图 4 看到, T1~T7 组的含水量分布从阴极到阳极整体均呈递减趋势, T4~T7 组含水量从阴极到阳极一直递减, T1~T3 组是先略有上升, 然后逐渐减小. 整体来说, T4 组含水量较小, T1 和 T3 组大致相当, 而 T2 组含水量最高. 另外, T6、T7 两组含水量差别不大, 低于 T5 组. 由此可见, 本试验保证通电时间一致时, 采用较短周期和较小通断比时, 间歇通电的最终电渗效果更好.

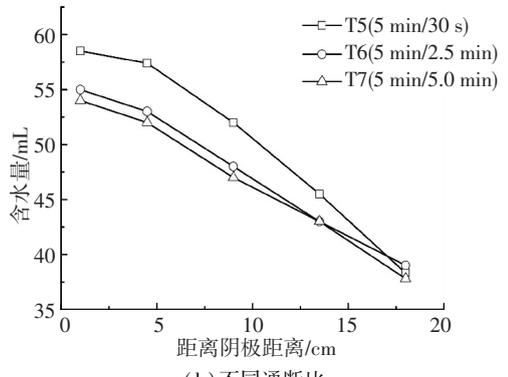
2.4 单位排水量能耗

为了比较各组试验能耗效率, 计算各组试验总能耗, 除以总排水量得到单位排水量能耗见图

5. 可以看出, 除了 T2、T5 组, 其他试验组的单位排水量能耗要低于连续通电. 由此可见, 合理设置通断电时间间歇通电技术可以提高电渗效率.



(a) 不同通电周期



(b) 不同通断比

图 4 电渗后含水量分布

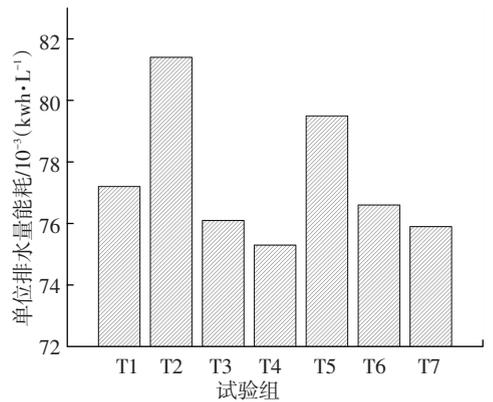


图 5 单位排水量能耗

2.5 试验结束时电极腐蚀情况

电渗效果不理想, 原因之一是电渗过程中, 阳极腐蚀严重, 增大了界面电势损失. 以下给出几组对比较为明显的阳极板腐蚀图, 图 6(b) 为 T1 组阳极腐蚀情况, T2 组与之类似, 腐蚀严重, 将 T2 阳极从土样槽中取出时, 可以明显看到整个土——电极接触面上较厚的锈蚀层. 图 6(c) 为 T6 组阳极腐蚀图, 板面上腐蚀较轻, 并没有形成完整的锈蚀层. 其他各组的阳极腐蚀情况介于 (b) 和 (c) 之间. 由此可见, 合理的间歇通电, 可以减缓电极腐蚀.



(a) 试验前电极



(b) T1 组



(c) T6 组

图6 电渗前后电极腐蚀情况

3 讨论

3.1 通断电模式的影响

第一阶段,在相同通断比下,进行多组不同通电周期的试验,并与连续通电对比.结果表明,在处理时间不受限制的情况下,采用短周期的间歇通电可以改进电渗处理效果.通电周期不能过长,长周期间歇通电如 T2 组,无论排水量,还是抗剪强度都不如连续通电,这一结论与文献[10]进行的长周期间歇通电试验结果一致.而短周期的间

歇通电,如 T4 组,电渗后的整体效果要优于连续通电.

第二阶段,采用短周期间歇通电,通过对比不同通断比的电渗效果来确定最优通断模式,结果表明处理时间不受限制时,选取较小的通断比,间歇通电可达到更好的处理效果,试验结果与文献[3]一致,与文献[13]相反.这主要是因为,文献[13]采用的控制条件为电渗处理时间,而非通电时间,其试验处理时间均较短,小通断比的优势无法体现.而本试验和文献[3]处理时间均较长,较小通断比下能实现后期电渗效果的发挥.

可见,间歇通电能否有效以及通电周期和通断比对电渗效果的影响会因试验时间的不同而存在差异,这也是已有文献报道对间歇通电认识不同的主要原因.由本文基于杭州软土的试验结果可知,采用较小的通电周期和通断比将达到更好的电渗效果.

3.2 原因探讨

对于间歇通电可以提高电渗效果的原因有两点:文献[8]认为,间歇通电可以减缓电极处的化学反应,减小阳极腐蚀,作者的试验结果也证明了这一观点,同时电渗过程中电极处电解反应产生气体阻碍电极与土体接触,而断电期间刚好可以使气体排出,引起土体断电再通电后,电流会有所上升;断电期间继续排水,由于本次试验设定各组通电时间一致,这样间歇通电组的排水时间要长于连续通电.文献[16]还指出,长时间通电会引起土体持续发热,造成电能浪费,利用间歇通电能改善这一现象.长周期间歇通电处理效果不佳,主要是因为其通电时间太长,阳极处的腐蚀情况并不能得到缓解,断电期间太长使得排水在断电中后期已停止,且已经运移到阴极周围的水,在毛细现象及反向水力梯度作用下,产生部分回流.

3.3 工程应用指导

前面亦有提到,电渗法实际工程应用中往往采用间歇通电技术,除了前述电渗效果方面的考虑之外,还涉及机械设备高负荷运转导致发热、电渗排水需及时排出等因素.将已有工程中间歇通电模式总结于表4,可以看到,已有工程中通电周期和通断比范围均较广.结合本试验结果,也即短周期间歇通电优于长周期以及通断时间比较小时电渗效果较好,建议通电周期不宜过长,取1~4 h为宜,再考虑到工期的限制推荐通断时间比取2.0.另外,采用间歇通电后,工期必然要长于连续通电,若工期较紧,可酌情适量提高通断时间比.

表 4 实际工程间歇通电模式总结

文献[16]	文献[14]	文献[19]		文献[20]	文献[11]	文献[15]
		场地 1	场地 2			
12 d/3 d, 10 d/7 d, 12 d/2 d	36 d/6 d, 8 d/7 d	25 min/1 min, 3.5 min/0.5 min	25 min/5 min	8 h/4 h	4 h/4 h	白天通电晚上断电

4 结 论

本文采用杭州软土开展一维电渗试验,探究了间歇通电技术改善电渗效果的有效性,从排水量、抗剪强度、含水量等角度比较了不同通电周期和通断比对电渗效果的影响.文中详细介绍了试验的过程和结果,在对比分析试验数据的基础上,得到以下结论:

1) 处理时间较短时,间歇通电的效果不如连续通电,只有在处理时间较长时,间歇通电的优势才会逐渐显示出来,这也是导致已有文献报道存在分歧的主要原因.

2) 选取适当的通电周期和通断时间比,间歇通电可以减缓电极腐蚀,提高电渗效率,使得排水量、抗剪强度等都优于常规电渗.

3) 实际工程应用中,建议通断周期选取 1~4 h,通断时间比取 2.0.可视具体工期调整间歇通电模式,若工期较为紧张,可酌情适量提高通断时间比.

参 考 文 献

- [1] CASSARANDE L. Electro-osmosis in soils [J]. Géotechnique, 1949, 1(3): 159-177.
- [2] SEGALL B A, BRUELL C J. Electro-osmotic contaminant-removal process [J]. Journal of Environmental Engineering, 1992, 118(1): 84-100.
- [3] SHANG J Q, LO K Y. Electrokinetic dewatering of a phosphate clay [J]. Journal of Hazardous Materials, 1997, 55(1-3): 117-133.
- [4] MOHAMEDHASSAN E, SHANG J Q. Effects of electrode materials and current intermittence in electro-osmosis [J]. Ground Improvement, 2001, 5(1): 3-11.
- [5] 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.
- [6] SPRUTE R H, KELSH D J. Limited field tests in electrokinetic densification of mill tailings [J]. Report of Investigations 8034, USBM, 1975.
- [7] LOCKHART N C, HART G H. Electro-osmotic dewatering of fine suspensions: the efficacy of current interruptions [J]. Drying Technology, 1988, 6(3): 415-423.
- [8] 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 (2): 287-302.

- [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: 12-35.
- [10] 龚晓南, 焦丹. 间歇通电下软黏土电渗固结性状试验分析[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2011, 42(6): 1725-1730.
- [11] 刘凤松, 刘耘东. 真空-电渗降水-低能量强夯联合软弱地基加固技术在软土地基加固中的应用[J]. 中国港湾建设, 2008, 157(5): 43-47.
- [12] YOSHIDA H. Electro-osmotic dewatering under intermittent power application by rectification of A. C. electric field [J]. Journal of Chemical Engineering of Japan, 2000, 33(1): 134-140.
- [13] GOPALAKRISHNAN S, MUJUMDAR A S, WEBER M E. Optimal off-time in interrupted electro-osmotic dewatering [J]. Separations Technology, 1996, 6(3): 197-200.
- [14] BJERRUM L, MOUM J, EIDE O. Application of electro-Osmosis to a foundation problem in a Norwegian quick clay [J]. Geotechnique, 1967, 17(3): 214-235.
- [15] 王引生. 电渗机理的探讨[J]. 上海地质, 1983, (4): 28-35.
- [16] BURNOTTE F, LEFEBVER G, GRONDIN G. A case record of electroosmotic consolidation of soft clay with improved soil-electrode contact [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2004, 41: 1038-1053.
- [17] BERGADO D T, BALASUBRAMANIAM A S, PATAWARAN M A B, et al. Electroosmotic consolidation of soft bangkok clay using copper and carbon electrodes with PVD [J]. ASTM Geotechnical Testing Journal, 2003, 26(3): 277-288.
- [18] SEGALL B A, BRUELL C J. Electro-osmotic contaminant-removal process[J]. Journal of Environmental Engineering, 1992, 118(1): 84-100.
- [19] SPRUTE R H, KELSH D J. Dewatering fine-particle suspensions with direct current[C]//Proceedings of the International Symposium of Fine Particle Processing. Las Vegas: [s.n.], 1980: 1828-1844.
- [20] 廖敬堂, 廖宏志. 真空电渗井点降水及低能量强夯加固技术在软基加固中的应用[J]. 华南港工, 2009, 114(1): 30-36.

(编辑 赵丽莹)