

# 季冻区软黏土路基电动化学加固试验研究

汤永强<sup>1,2</sup>,王宁伟<sup>1,2</sup>,王松<sup>2</sup>,佟舟<sup>3</sup>

(1. 中国地震局工程力学研究所,中国地震局地震工程与工程振动重点实验室,黑龙江 哈尔滨 150080;  
2. 沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁 沈阳 110168;3. 沈阳城市建设学院土木工程系,辽宁 沈阳 110167)

**摘要** 目的 利用电动化学加固方法治理季冻区铁路路基冻害,为电动化学法处理寒冷地区软土路基冻害提供理论依据. 方法 进行4组室内电动化学加固试验,监测试验过程中的电流、排水量及能耗值. 通电结束后7 d,对阳极、中间和阴极区域的承载力进行测试. 结果 试验T4的承载力增加最大,7 d的龄期达到了156 kPa,相较于初始承载力提高了近3.5倍;分别在阳极注入氯化钙,阴极注入水玻璃,土体各区域的强度提高均匀;利用改性聚氨酯处理中间渣土层,形成了致密的隔水层,切断了土层间的水力联系,减缓了地下水通过渣土层向上迁移的问题,切断了上层粉质黏土冻胀的补水通道. 结论 应用电动化学加固治理软黏土路基的冻胀问题,可以降低土体含水率,提高土体强度,并有效形成防渗隔水膜,可以有效解决季节性冻土区路基冻害问题.

**关键词** 电动化学加固;改性聚氨酯;氯化钙;硅酸钠;路基冻害;承载力

中图分类号 TU391

文献标志码 A

## Experimental Study on Electrokinetic Stabilization of Soft Clay in Seasonal Frozen Ground Regions

TANG Yongqiang<sup>1,2</sup>, WANG Ningwei<sup>1,2</sup>, WANG Song<sup>2</sup>, TONG Zhou<sup>3</sup>

(1. Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration of China Earthquake Administration, China Earthquake Administration, Harbin, China, 150080; 2. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 3. Department of Civil Engineering, Shenyang Urban Construction, Shenyang, China, 110167)

**Abstract:** The application of electrokinetic stabilization was used to prevent the frozen damage of railway roadbed in seasonal Frozen area, and to provide theoretical basis for treatment of freezing damage of soft soil roadbed in cold area by electrokinetic stabilization. Four groups of indoor electrochemical reinforcement tests were carried out to monitor the current, displacement and energy consumption during the test. The bearing capacity of anode, middle and cathode regions was measured after 7 days respectively. The bearing capacity of the soil was increased to 156 kPa in 7 days, which was 3.5 times higher than that of the initial load. When calcium chloride was injected at the anode and sodium silicate was injected into the cathode, the strength of each region of the

收稿日期:2019-03-26

基金项目:国家自然科学基金项目(51178347)

作者简介:汤永强(1982—),男,博士研究生,主要从事软土地基电化学加固等方面研究.

soil was increased uniformly. After grouting treatment was applied to the residual layer, the problem of groundwater which migrated upward through the residual layer was alleviated, and cuts off the channel of rehydration of the upper silty clay, which can effectively reduce the frost heave disaster. It can effectively reduce frost heaving disaster by cutting off the water channel of upper silty clay frost heaving. The application of electric chemical reinforcement to treat the frost heave problem of soft clay subgrade can reduce the moisture content of soil, improve the strength of soil, and effectively form anti-seepage water insulation film, which provides a new idea for solving the problem of subgrade freezing damage in seasonal frozen soil area.

**Key words:** electrokinetic stabilization; modified polyurethane; calcium chloride; sodium silicate; roadbed freezing injury; bearing capacity

我国季节冻土区主要分布在东北、西北、华北及内蒙古地区,其冻结深度由南向北,由低海拔向高海拔区逐渐增厚,最大达3.0 m 左右<sup>[1]</sup>.在富含软黏土的季冻区,冻融作用使排水能力差的软黏土路基常处于饱和态,工程性质差,严重影响交通运输.研究表明,土的基本性质不同程度的影响着冻胀性,尤其是黏土颗粒含量大的土体.随着国家建设的不断增加,未来将有更多的道路穿越季冻区,探索出新的便捷而又行之有效的病害处理方法具有重要意义<sup>[2-3]</sup>.

电渗加固软黏土技术是近几年发展起来的新技术,国内外学者进行了大量的研究<sup>[4-9]</sup>.电动化学加固软黏土,是在饱和软黏土中施加直流电场,土体内发生复杂的物理化学反应.国内外学者先后对电动化学加固展开了研究,其中大部分使用不同化学试剂对不同土壤进行室内试验研究,这些溶液包含铝离子、钙离子、磷酸和硝酸根离子,结果表明,处理后土体强度提高了5~6倍,液塑限增加近30%<sup>[10-12]</sup>.台湾欧章煜等利用自行设计的试验装置,对台北地区的沉淀黏土进行了一系列试验,包括溶液的注入方式和时间间隔,同时探讨了阴极区域的强度增长机理<sup>[13]</sup>.许多学者从微观方向对电动化学加固进行研究,包括土体中离子的变化,处理后土体的结构特性,阳离子的交换能力对于电动化学加固的影响<sup>[14-17]</sup>.王宁伟等<sup>[18-19]</sup>自行设计了室内电动加固试验装置,通过现场试验证

明了该方法加固淤泥质软土的有效性.

笔者将电动化学加固方法应用于季冻区软黏土路基的治理,探讨了电动化学加固方法在路基冻害治理方面的应用.结果表明,电动化学加固方法较好地解决了路基上层黏土排水难的问题,利用改性聚氨酯处理中间渣土层,形成了致密的隔水层,切断了土层间的水力联系,降低了路基冻胀的发生,为软黏土路基的冻害治理提供了借鉴.

## 1 试验方案

### 1.1 试验装置

试验装置主要由直流电源、金属电极、注浆PVC管、电流表、土样箱组成.电动加固试验装置如图1所示.

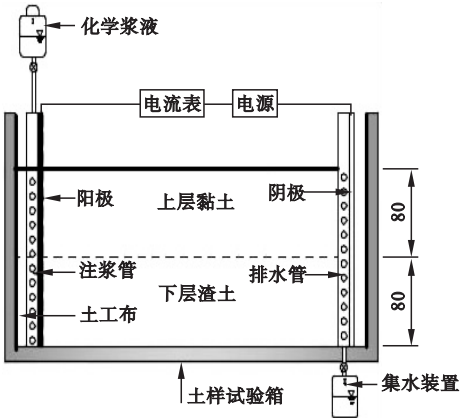


图1 试验装置

**Fig. 1** Schematic diagram of the electrokinetic experiment

土样试验箱是该试验装置的主体,全部由丙烯酸构成,试验箱的长宽高为420 mm ×

320 mm×200 mm. 将土工布紧贴在土样箱左右两侧,防止水分在自然条件下蒸发. 电极采用长 200 mm、直径 6 mm 的铁棒. 将直径 15 mm 的 PVC 管捆绑于阳极作为注浆管.

1.2 土 样

试验土样为某铁路典型地段的扰动土样. 土样共分三层,其中上层土为 0~0.5 m 厚度的粉质黏土,灰褐色,颗粒较小,土中有碎石块,初始含水率为 15.40%;中间土层为厚度 0.2~1.0 m 的渣土,呈灰黑色,颗粒较大,初始含水量为 17.40%;下层土为厚度 1~1.5 m 的黏土,呈黑色,颗粒中等,初始含水量为 18.30%.

1.3 试验方法

试验分为两个步骤:试验 1 进行 4 组实验,基本参数见表 1. 向土中注入不同的化学浆液,第一组试验在阳极注入质量分数为 25% 的氯化钙浆液;第二组试验用质量分数为 25% 的氯化钙浆液进行去极化处理,使其 pH=11;第三组试验在阳极灌入波美度为 29Be 的水玻璃浆液;第四组试验先在阳极注入质量分数为 25% 氯化钙浆液,静置 24 h 后再灌入波美度为 29Be 的水玻璃浆液. 4 组试验的电势梯度均为 30 V. 将原状土烘干、碾碎、过筛,然后按目标含水率计算并称取相应

重量的干粉和水,配制成重塑土;用导线连接电极,往模型槽分层填土,并保持土体密实;开启电源进行电渗.

表 1 试验 1 参数

Table 1 Basic parameters of experiment 1				
试验编号	含水率/%	电压/V	通电时间/h	注入溶液
T1	45.1	30	22	CaCl <sub>2</sub>
T2	46.0	30	16	CaCl <sub>2</sub>
T3	42.1	30	28.5	水玻璃
T4	48.9	30	21	CaCl <sub>2</sub> +水玻璃

试验 2 模拟实际施工现场,研究表明上层粉质黏土是产生冻胀的主要因素,因此仅对上层粉质黏土进行电化学处理,而对中间渣土层采用隔水处理. 对试验土样进行分层设计,下层为渣土层,上层为粉质黏土层. 首先对下层渣土层灌入改性聚氨酯,然后对上层粉质黏土进行电化学加固处理. 试验参数见表 2. 化学浆液通过注射器压入注浆管. 上层粉质黏土的电动化学加固试验采用三组电极平行布置的形式,阳极、阴极距离均为 15 cm,阳极与阳极之间的距离为 10 cm. 试验 1 和试验 2 均监测电流、能耗和排水量以及电渗前后土体不同区域承载力值. 土体不同区域划分见图 2.

表 2 试验 2 参数

Table 2 Basic parameters of experiment 2				
土层	试验装置长宽高/cm	铺设土体厚度/mm	土体性质	处理方法
上层粉质黏土	30×20×25	100	含水率 35%,初始承载力 50 kPa	电化学灌浆
下层渣土层	30×20×25	50	透水性好	灌入改性聚氨酯

2 试验结果与分析

2.1 电 流

图 3 为电动化学加固试验电流随时间变化曲线. 由图可见,电流随通电时间都呈现出先增后减的变化趋势. 粉质黏土在未灌入氯化钙浆液以前,电流呈现波动状态,最小值为 40 mA,最大值为 80 mA,在第 6~12 小时每隔 1 h 灌入浆液,电流值持续增大,直至第

12 小时达到峰值 120 mA,过 A 点之后断电间歇,间隔 12 h 后,继续通电,电流值变为初始电流值 40 mA,并保持不变,通电时间总计 18 h. 如图 3 所示,试验 T2 通电开始的一段时电流先呈线性增加,之后有一段时间电流基本不发生变化,但电流仍然保持着较高值. 试验 T1 和试验 T4 都出现了电流值突然下降的点,试验 T3 电流值波动不大,始终保持在较低的位置.

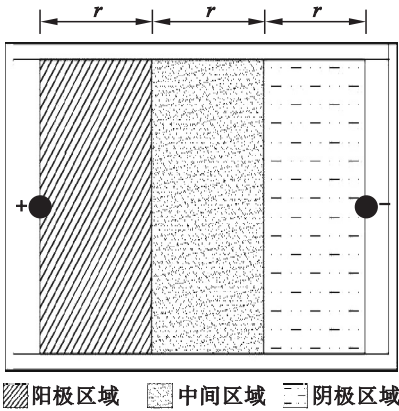


图2 土体加固区域划分

Fig.2 Soil reinforcement area division

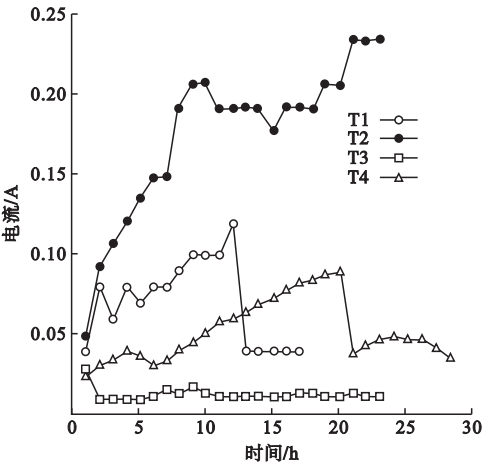


图3 电流随时间变化曲线

Fig.3 Current in the electro-osmosis

2.2 排水量

排水量随时间变化曲线见图4.

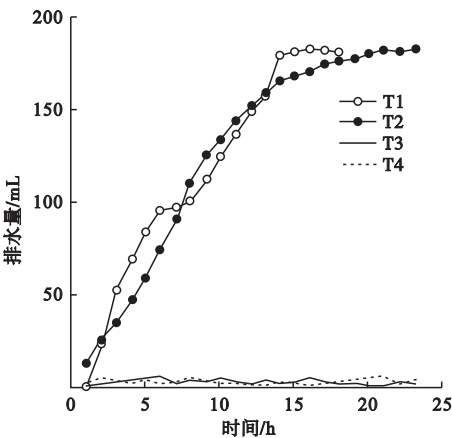


图4 排水量随时间变化曲线

Fig.4 Curves of displacement over time

从图中可以看出,试验 T1 和试验 T2 的排水量有着相同的变化趋势,在试验开始一段时间内,排水量呈线性增加,随后排水量增加速率逐渐变小,直至基本不排水时,试验结束.由于试验 T3 和 T4 中加入水玻璃浆液以后,在阳极区域的土体强度迅速增高,从而使阳极区域的电阻变大,排水量大幅度减小.

2.3 能耗

电化学加固的耗能公式如下:

$$E = E_0 + \sum U_i I_i t_i . \tag{1}$$

式中: $E_0$  表示  $t_0$  时刻的耗能; $U_i$  表示  $t_i$  时刻土体的电压; $I_i$  表示  $t_i$  时刻的电流值.

从式(1)可以看出,在电压和时间相同的条件下,耗能与电流成正比.4 组试验的能耗随时间变化曲线见图5.由图可以看出,能耗均随时间呈线性变化.试验 T2 能耗最大,达到 135 kW/h,说明保持注入溶液的 PH 值能够不断地中和阳极区域产生的酸性环境,延缓电极的腐蚀速度,使电流缓慢衰减,从而提高处理效率.其他三组试验的能耗增幅平缓,T3 的能耗最低.表明在电化学加固过程中,硅酸钠的引入可降低能耗.

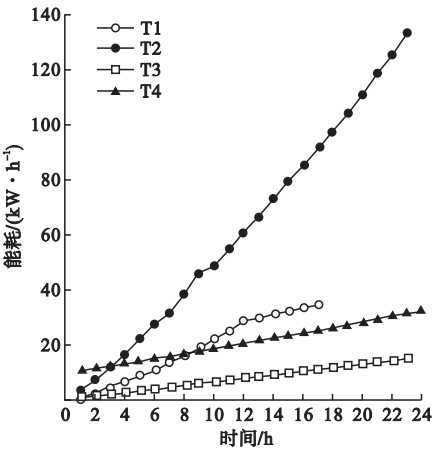


图5 能耗曲线

Fig.5 Energy consumption curves

2.4 强度

不同区域范围内土体强度随时间变化曲线如图6所示.

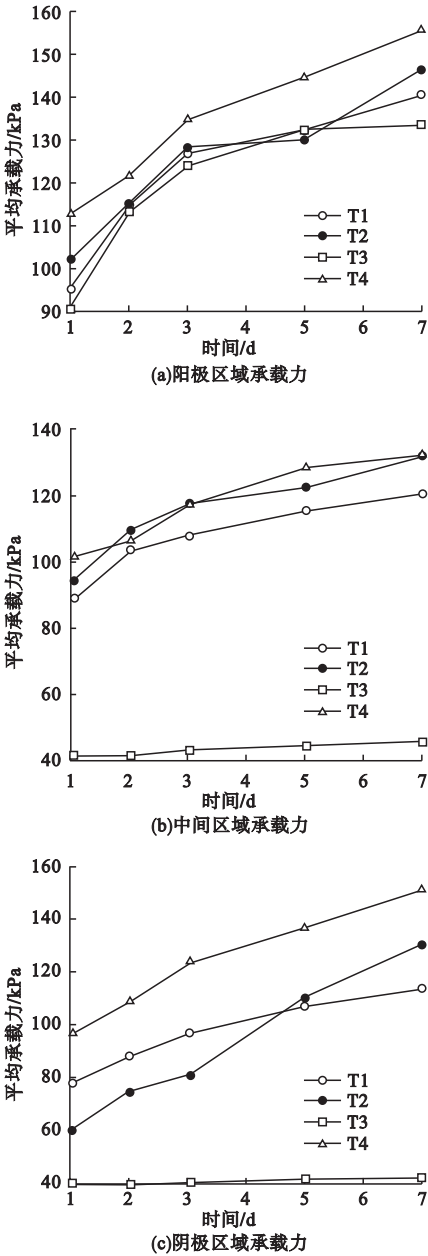


图 6 不同区域承载力-时间变化曲线

Fig. 6 Load-time variation curves of different regions

从图中可以看出,处理后土体的承载力随着龄期的增加不断加大,基本呈线性增加.无论是哪种方式,阳极区域的承载力提高幅度最大,承载力最低处也达到了90 kPa以上,试验 T4 的承载力增加最大,7 d 的龄期达到了 156 kPa,相较于初始承载力提高了近 3.5 倍,说明联合注入氯化钙和硅酸钠后强度增强的效果最明显.电化学加固试验的承载

力提高较大,因土体中引入  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{SiO}_3^{2-}$  会明显提升土体的承载力.由图 6 可知,除了阳极外,试验 T3 在其他区域的承载力无明显提高.加固效果较差,分析原因,注入水玻璃使土体产生胶结而堵塞了排水通道,随着通电时间的延长,水分子无法移动到阴极处及时排出.另外,阴极处也缺少能够进行火山灰反应的  $\text{Ca}^{2+}$ ,导致阴极处含水率不断升高,承载力下降.从图中可以看出,试验 T1、T2、T4 在阳极和中间区域都表现出了良好的加固效果,各组试验之间的承载力差值不明显.在阴极区域,各组试验承载力相差较多,其原因在于阴极排水过程中,稀释了化学试剂的浓度,提高了阴极区域土体的含水量.试验 T4 在各个区域的承载力都达到了 100 kPa,说明了试验 T4 注浆方式的有效性,加固的土体范围更广、强度更高.

图 7 为试验 1 不同区域土体平均承载力随龄期变化曲线.阳极区域承载力提高主要是由于离子交换及土体含水率的降低引起,而阴极区域的承载力提高主要由钙离子沉淀及土壤胶结导致.试验 T2 中间区域承载力与阳极区域承载力较为接近,说明加固区域变大,这是由于去极化的处理方法所起的作用,同时阴极区域承载力随着龄期的增加,强度快速增长.从图 7 还可以看出,阳极区域、阴极区域承载力值增幅较快,中间区域承载力增幅较缓,并且在龄期 7 d 后阳极区域承载力与阴极区域承载力较为接近,说明阴极区域承载力增幅较快.

试验 2 结束后,对粉质黏土进行不同龄期的微型触探试验,得出承载力结果见表 3.从表 3 可以看出,加固后不同龄期的承载力平均值均比加固前的承载力有大幅度的提高,同时随着龄期的增长,三个区域的强度值也得到提高.



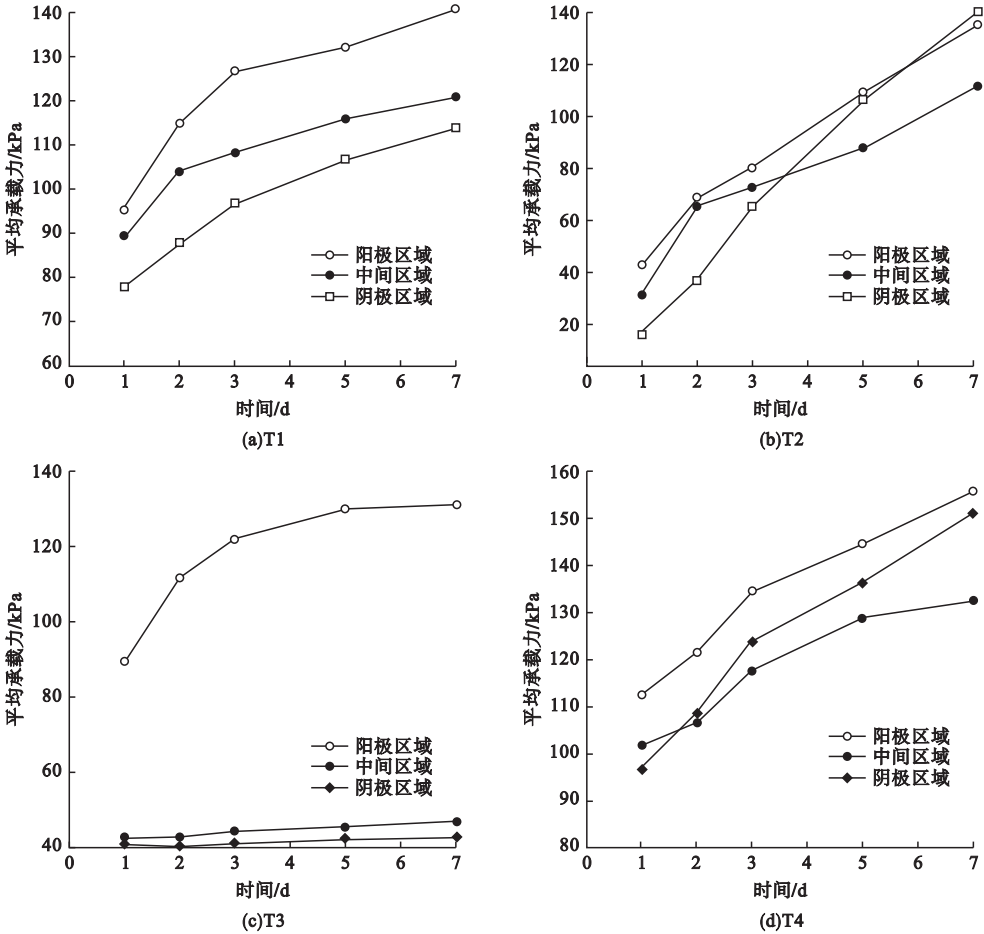


图7 不同区域土体承载力分布图

Fig.7 Soil bearing capacity distribution in different regions

表3 电化学加固后不同龄期承载力对比

Table 3 Comparison of bearing capacities at different ages after electrokinetic stabilization

土样	位置	承载力/ kPa				
		龄期 1d	龄期 3d	龄期 5d	龄期 7d	龄期 9d
粉质黏土	阳极	94	109	115	131	146
	中间	88	107	111	120	133
	阴极	79	91	107	130	149

图8为试验2各区域平均承载力随时间变化曲线.从图可以看出,强度最高的区域出现在阳极,最高平均强度达到140 kPa,阴极区域强度提高也较为明显.图9为试验2结束后8 d土体的效果,从图中可以看出,土体的上面和底面加固效果均比较好,土体的上面、下面形成一个完整的加固体,浆液也较均匀的渗透到土体中.静置一个月后,取出的土

样,可以看出经过电化学加固后粉质黏土的变化(见图10),尤其是阳极区域,此时的土体性质得到了改良,含水率降低,去除了产生冻害的因素.下层渣土灌入改性聚氨酯,如图11所示,形成一层致密的、具有一定强度和厚度的稳定隔水层(见图11),可以有效地阻止地下水向上浸透,对消除地下水向上的迁移具有良好的作用.可见,针对不同土层采用

不同的处理方法,利用各自的优点较好底解决了路基冻害的基本问题.

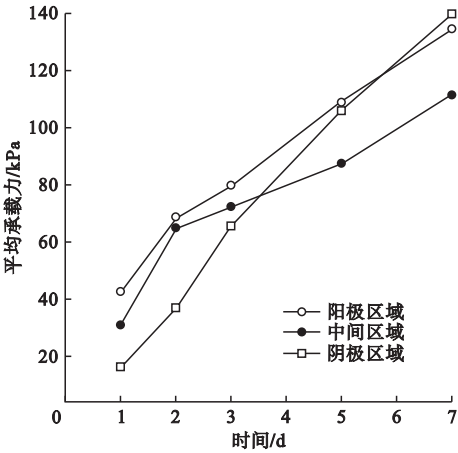
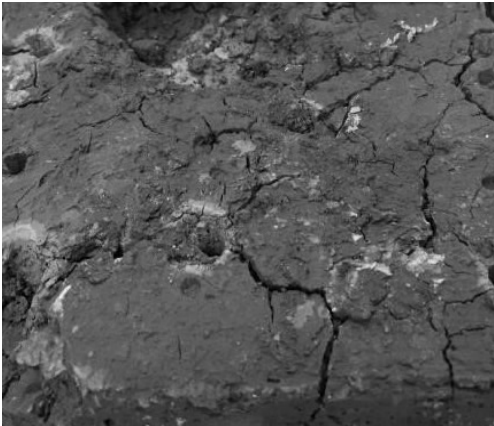
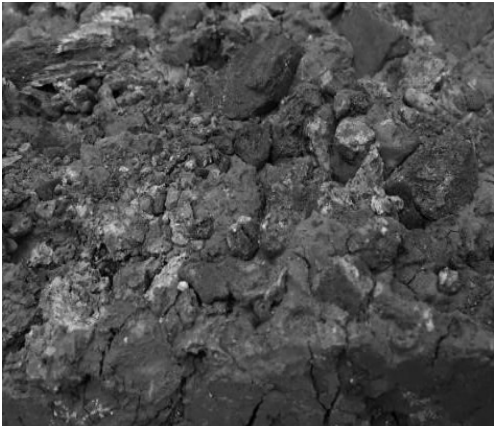


图8 各区域承载力随龄期变化曲线

Fig.8 Bearing capacity of each region increases with the phase



(a)上表面效果



(b)下表面效果

图9 龄期8 d 土样效果

Fig.9 Effect of soil after 8d



图10 电动化学加固后的土样

Fig.10 Soil samples after electrochemical

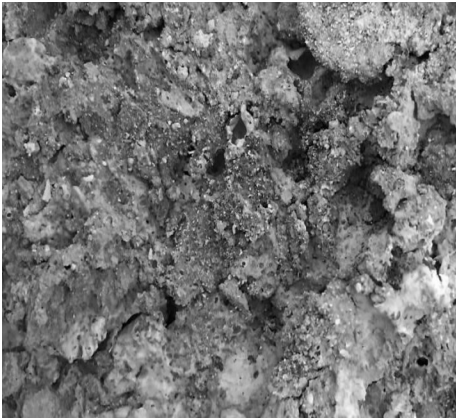


图11 灌入改性聚氨酯形成的隔水层

Fig.11 Water-proof layer formed by injection of modified polyurethan

3 结 论

(1)阳极去极化处理对电动化学加固效果有比较明显的促进作用.

(2)试验 1 中,电动化学加固使上层粉质黏土强度提高了 1.3 ~ 3.5 倍,平均提高 2.5 倍,试验 T2 中间区域的强度与阳极区域较为接近,使加固范围扩大. 试验 T4 的承载力增加最大,7 d 的龄期达到了 156 kPa.

(3)试验 2 通过对渣土层的隔水处理和上层粉质黏土的电动加固处理,可以隔离地下水的向上迁移,并且使上层粉质黏土孔隙大幅度减小,土体更加密实. 应用电动化学加固治理软黏土路基的冻胀问题,可以降低土体含水率,提高土体强度,并有效形成防渗隔

水膜,利用分层处理收到了良好的效果,为季冻区软黏土路基冻害治理提供了新思路。

## 参考文献

- [1] 王天亮,刘建坤,田亚护.冻融作用下水泥及石灰改良土静力特性研究[J].岩土力学,2011,32(1):193-198.  
(WANG Tianliang, LIU Jiankun, TIAN Yahu. Static properties of cement-and lime-modified soil subjected to freeze-thaw cycles [J]. Rock and soil mechanics, 2011, 32(1): 193-198.)
- [2] 武立波,祁伟,牛富俊,等.我国季节性冻土区公路路基冻害及其防治研究进展[J].冰川冻土,2015,37(5):1283-1293.  
(WU Libo, QI Wei, NIU Fujun, et al. A review of studies on roadbed frozen damage and countermeasures in seasonal frozen ground regions in China [J]. Journal of glaciology and geocryology, 2015, 37(5): 1283-1293.)
- [3] 齐吉琳,马巍.冻土的力学性质及研究现状[J].岩土力学,2010,31(1):133-143.  
(QI Jilin, MA Wei. State-of-art of research on mechanical properties of frozen soils [J]. Rock and soil mechanics, 2010, 31(1): 133-143.)
- [4] 周亚东,付继宇,邓安,等.真空预压-电渗联合作用下软黏土非线性大变形固结模型[J].岩石力学与工程学报,2019,38(8):1677-1685.  
(ZHOU Yadong, FU Jiyu, DENG An, et al. A nonlinear model for electroosmosis-vacuum preloading coupled consolidation [J]. Journal of rock mechanics and engineering, 2019, 38(8): 1677-1685.)
- [5] 谢新宇,郑凌透,谢康和,等.电势梯度与电极间距变化的滨海软土电渗模型试验研究[J].土木工程学报,2019,52(1):112-118,125.  
(XIE Xinyu, ZHENG Lingyu, XIE Kanghe, et al. Experimental study on electro-osmosis of marine soft soil with varying potential gradient and electrode spacing [J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2019, 52(1): 112-118, 125.)
- [6] WU H, HU L, WEN Q. Numerical simulation of electro-osmotic consolidation coupling non-linear variation of soil parameters [J]. Computers & geosciences, 2017, 103: 92-98.
- [7] YUAN J, HICKS M A. Numerical simulation of elasto-plastic electro-osmosis consolidation at large strain [J]. Acta Geotechnica, 2016, 11(1): 127-143.
- [8] CHANG C C, SHEEN M S. Deduction of three-dimensional electro-osmotic theory [J]. Environmental geotechnics, 2015, 3(1): 47-60.
- [9] LEMAIRE T, MOYNE C, STEMMELEN D. Modelling of electro-osmosis in clayey materials including pH effects [J]. Physics & chemistry of the earth, 2012, 32(1): 441-452.
- [10] MALEKZADEH M, SIVAKUGAN N. One-dimensional electrokinetic stabilization of dredged mud [J]. Marine georesources & geotechnology, 2017, 35(5): 603-609.
- [11] LIU F, FU H, WANG J, et al. Influence of soluble salt on electro-osmotic consolidation of soft clay [J]. Soil mechanics & foundation engineering, 2017, 54(1): 49-55.
- [12] ABDULLAH W S, AL-ABADI A M. Cationic-electrokinetic improvement of an expansive soil [J]. Applied clay science, 2010, 47(3/4): 343-350.
- [13] OU C Y, CHIEN S C, LEE T Y. Development of a suitable operation procedure for electroosmotic chemical soil improvement [J]. Journal of geotechnical & geoenvironmental engineering, 2013, 139(6): 993-1000.
- [14] 刘飞禹,李玲玉,王军,等.阳极灌浆溶液对电渗加固软土地基的影响[J].中国公路学报,2019,32(3):44-52.  
(LIU Feiyu, LI Lingyu, WANG Jun, et al. Effect of anodic grouting with different solutions during electro-osmosis on a soft foundation treatment [J]. China journal of highway and transport, 2019, 32(3): 44-52.)
- [15] 任连伟,肖扬,孔纲强,等.化学电渗法加固软黏土地基对室内试验研究[J].岩土工程学报,2017,40(7):1-9.  
(REN Lianwei, XIAO Yang, KONG Gangqiang, et al. Laboratory tests on soft ground improvement by chemical electro-osmosis method [J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2017, 40(7): 1-9.)
- [16] 郭康仕,庄艳峰,段伟.蒙脱石电渗微观机理试验研究[J].浙江大学学报(工学版),2017(12):2373-2382.  
(GUO Kangshi, ZHUANG Yanfeng, DUAN Wei. Experimental study on microcosmic mechanism of montmorillonite electroosmosis [J]. Journal of Zhejiang university (engineering science), 2017(12): 2373-2382.)
- [17] 彭劼,谢高强,苏波.电渗作用下高岭土的元素及矿物成分变化[J].河海大学学报(自然科学版),2016,44(2):135-140.  
(PENG Jie, XIE Gaoqiang, SU Bo. Effects of electroosmosis on variation of elemental and mineral composition of kaolin [J]. Journal of Hohai university (natural sciences), 2016, 44(2): 135-140.)
- [18] 王宁伟,刘铁,于辉,等.电化学注浆加固软土效果的试验研究[J].水利与建筑工程学报,2017,15(6):7-11.  
(WANG Ningwei, LIU Tie, YU Hui, et al. Experimental study on the effect of Electrochemical grouting in strengthening soft soil [J]. Journal of water resources and architectural engineering, 2017, 15(6): 7-11.)
- [19] ZHANG L, WANG N W, JING L P, et al. Electro-osmotic chemical treatment for marine clayey soils: a laboratory experiment and a field study [J]. Geotechnical testing journal, 2016, 40(1): 72-83.  
(责任编辑:杨永生 英文审校:刘永军)