

立体排水-电极联合体处理高含水率废弃土的试验研究

王加勇^{1,2}, 陈庚^{1,2*}, 陈永辉^{1,2}, 陈龙^{1,2}

(1. 河海大学 岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210098;

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: 针对高含水率废弃土的自身特点, 提出了一种适用于超软土加固的可回收立体排水-电极联合体, 并根据立体排水-电极联合体空间布置情况, 试验设计从过程中排水量、含水率与抗剪强度、沉降变化、电势分布、电流变化以及能耗情况出发, 对比分析不同条件下的土体电渗固结性状, 结果表明: (1) 立体排水-电极联合体增加了横向排水通道之后, 缩短了排水固结路径, 使土体中部维持着一个较高的电势水平, 相对于传统竖向电极排水量最大提高 38%; (2) 增加横向排水体后抗剪强度单层式与双层式联合体分别提高 3.0 倍和 1.5 倍, 且土体强度更加均匀; (3) 引入了统一能耗系数概念, 增加横向排水体后能耗系数从 0.163 降低到 0.154, 体现了立体排水-电极联合体的优越性。

关键词: 高含水率废弃土; 立体排水-电极联合体; 电渗; 排水量; 能耗系数

中图分类号: TU471

文献标识码: A

Experimental Study on the Treatment of Waste Soil with High Water Content by the Combination of Solid Drainage and Electrode

WANG Jiayong^{1,2}, CHEN Geng^{1,2*}, CHEN Yonghui^{1,2}, CHEN Long^{1,2}

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University,

Nanjing, Jiangsu 210098, China 2. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and

Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China)

Abstract: According to the characteristics of waste soil with high water content, a kind of recyclable solid drainage electrode combination suitable for super soft soil reinforcement was proposed. According to the spatial layout of the solid drainage electrode combination, the test is designed. The water discharge, water content and shear strength, settlement change, potential distribution, current change and energy consumption, the electro osmotic consolidation of soil under different conditions were compared and analyzed. The results show that: (1) after increasing the transverse drainage channel, the drainage consolidation path is shortened, and the middle part of the soil maintains a high potential level, which increases the maximum drainage capacity by 38% compared with the traditional vertical electrode; (2) The shear strength of the single-layer and double-layer combination is increased by 3.0 and 1.5 times respectively after increasing the transverse drainage body, and the soil moisture content is increased by 3.0 times and 1.5 times respectively (3) The concept of uniform energy consumption coefficient is introduced to reduce the energy consumption coefficient from 0.163 to 0.154 after adding horizontal drainage body, which reflects the advantages of three-dimensional drainage electrode combination.

Key words: waste soil with high moisture content; solid drainage electrode complex; electroosmosis; drainage; energy consumption coefficient

收稿日期: 2020-07-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51708176); 江苏省交通运输科技项目(2017002)

作者简介: 王加勇(1996-), 男, 四川广元人, 硕士研究生, 从事软土地基处理方面的研究。

* 通讯作者: 陈庚(1987-), 男, 山东淄博人, 博士, 副教授, 从事软土地基处理方面的研究。

随着国民经济的快速发展,城市化进程的不断推进,我国许多地区的河流、湖泊泥水环境急剧恶化,河道、航道淤泥淤积日益严重,为此我国每年都要进行总量巨大的河湖疏浚工程。我国对于疏浚淤泥的处置方法主要是就近弃土,大量的疏浚淤泥形成了许多的淤泥堆场,这些堆场占用了大量的土地资源。如何对高含水率废弃土进行固化处理,如何更进一步利用这些高含水率废弃土成为学者的研究热点。

电渗排水固结法是一种新兴的软基处理方法,Casagrande^[1]首次在德国某铁路边坡开挖工程中引入电渗技术,随后电渗法在软土地基处理、堤坝稳定、提高桩基承载力、环境岩土等方面得到应用;Bjerrum^[2]利用电渗加固挪威灵敏性粘土提出了电渗排水涉及到的七个方向,为后续试验研究提供了方向;庞宽等^[3]研究发现了渗透系数的衰减规律;庄艳峰等^[4-5]对于电渗过程中存在的界面电阻进行了研究,并详细介绍了电动土工合成材料及其应用;龚晓南等^[6]对轴对称条件下的电渗过程进行了室内试验,并初步验证了间歇通电的优势;焦丹等^[7]进行轴对称工况软黏土不同初始条件及通电条件下的电渗试验,得出电渗法对软黏土地基处理效果良好;潘东庆等^[8]对于电渗过程中界面电阻进行了研究,对电压损耗不断变大的原因进行了分析;Lefebvre等^[9]在金属电极表面添加了一层特殊的化学镀膜,有效降低了接触电阻,提高了电渗效率;Laursen^[10]用斑驳土第一次进行了简单电渗试验,说明土体的含盐量影响电渗效率;孙益成^[11]研究得出非饱和土电渗加固效果不及饱和土的结论;王柳江等^[12]对于电极的布置形式进行了研究,研究了阳极的数目以及电极间距对于电渗的影响;李一雯等^[13]对长方形、梅花形、平行错位3种不同电极排列形式进行了研究,认为平行错位效果最好、成本最低;张雷等^[14]采用铁、铜、铝和新型复合材料电极进行电渗试验,发现新型复合电极材料加固强度提升较高且相对均匀。

通过对电渗法处理软土试验研究的分析发现,前人在电极材料、通电方式、电极布置、联合处理等方面对电渗处理软土方法进行不断的改进,但传统工程排水采用的排水体或电极为单一竖向布置,存在结构布置单一、耗能过大等问题。本文针对高含水率废弃土的自身特点,提出一种适用于超软土加固的立体排水-电极联合体,该联合体可在超软土中形成立体排水通道,缩减土体固结

路径;同时,实现排水体与电极的复合应用,在土体内部可实现多电极分布,减少电极距,可加速超软土的排水固结。本文从工程技术创新改进的角度出发,围绕立体排水-电极联合体进行试验研究。

1 立体排水体-电极联合体结构特征及材料选择

立体排水-电极联合体由立体排水-电极结构体与外包滤布组成,图1为立体排水-电极结构体的构造图。单体的立体排水-电极结构体主要包括1根竖向电极管和4根横向排水电极管,其中,4根横向排水电极管在同一平面相互垂直;并分别在竖向排水管与横向排水电极管上均匀设置排水孔洞(开孔率不小于5%);同时在竖向排水电极管的侧壁设置用以支撑横向排水管转动的转动轴及转动叶瓣,该设计可使得横向排水管能在竖直方向上做 $0^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 转动;在立体排水-电极结构体竖向排水电极管的上端及下端,分别为上部外螺旋接口和下部内螺旋接口。外包滤布采用普通无纺滤布($O_{95} < 0.075 \text{ mm}$),缝合方式为针织缝合、热轧粘合,保证土颗粒不会进入排水体内部。立体排水-电极联合体在理论上可实现多次回收利用,利于环保。

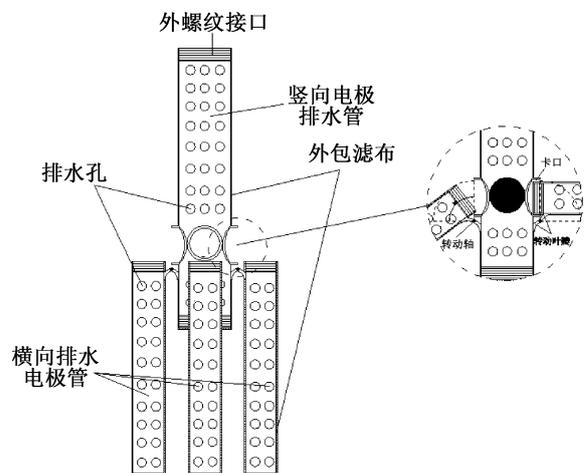


图1 立体排水-电极体结构构造图

Fig. 1 Structure diagram of Solid drainage electrode body

针对不同深度土体处理要求,通过接头处的螺纹连接,将多个单体的立体排水-电极结构体竖向连接,在其表面外包滤布后形成不同长度的立体排水-电极联合体。为适应室内小尺寸模型试验需求,实际立体排水-电极联合体横向排水电极管与竖向排水电极管采用金属焊接方式连接,焊接不影响排水体排水,只是在打设时不会自动张



图 2 立体排水-电极体实物图

Fig. 2 Factual picture of the solid drainage electrode body

开,对试验结果无影响。图 2 为立体排水-电极联合体实物图。

2 试验设计

2.1 试验装置

电渗试验装置如图 3 所示,主体装置由试验模型箱、直流电源、电势采集盒、电脑端组成。模型箱为透明塑料储物箱,其内部尺寸为 450 mm×340 mm×300 mm,底部打设四个直径为 15 mm 的孔,用于固定电极以及排水通道,孔洞处连接引水管,其下放置烧杯收集电势排水,接口处用热熔胶进行密封。另外选用尺寸为 30 mm×30 mm×8 mm 的塑钢板与 10 mm×5 mm×100 mm 的塑钢条制作微型沉降标,并在模型箱上边缘处粘贴三根塑钢条,用于试验中土体沉降测量;采用铜芯探针测量电势分布。

电源选用兆信 RXN-605D 型号直流稳压电源,可提供 0~5 A 电流和 0~60 V 电压。电渗试验结束后采用十字板剪切仪 (MCC-GEO1153) 测试试样强度。

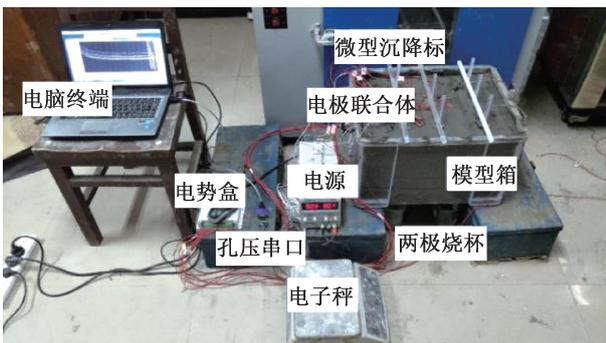


图 3 电渗试验装置图

Fig. 3 Electroosmosis test device diagram

2.2 试验内容及步骤

本文试验土样取自苏锡常南部高速公路常州至无锡段太湖隧道淤泥土,其基本物理指标如表 1 所示。试验总共分为 3 组,具体的对比情况如表 2 所示。

试验前三组形成对比试验,T1 和 T2 对比,主要探究在增加横向排水电极后,与传统的竖管电极相比优势所在;T2 和 T3 对比,研究在增加横向排水体数量,也就是在空间立体上增加层数后,排水效率能增大多少。

表 2 试验条件汇总

Tab. 2 Summary of test conditions

试验编号	电极类别	电压/V
T1	单管电极	30
T2	单层式立体排水体	30
T3	双层式立体排水体	30

试验电压定为 30 V,对应的电势梯度为 1.5 V/cm,前人的模型试验中电势梯度基本在 1~2 V 之间,根据实际情况本试验选择了中间数。电极的布置形式对电渗加固效果有一定影响,浙江大学李一雯^[13]在室内对长方形、梅花形以及平行错位布置进行了对比研究,从排水量上推荐采用长方形或者平行错位,梅花形布置的情况下产生的纵贯裂缝比较复杂,会对电渗的效果产生负面效果。结合本试验的具体情况,本试验采用了正方形对称布置的方案,测点布置平面图如图 4 所示。

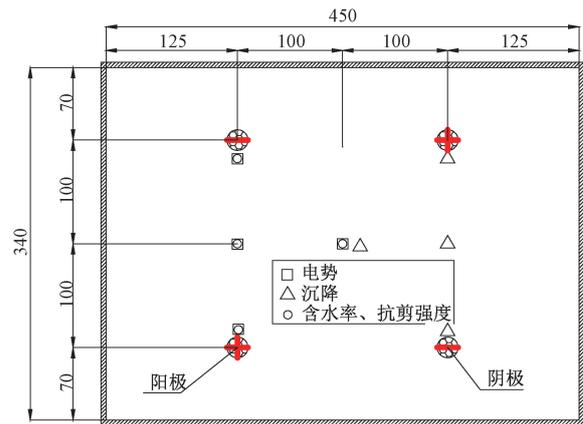


图 4 测点布置平面图(单位:mm)

Fig. 4 Layout plan of measuring points

表 1 原状土样的基本物理指标

Tab. 1 Basic physical indexes of undisturbed soil samples

含水率/%	孔隙比	比重 G_s	渗透系数 $K/(cm \cdot s^{-1})$	液限 $w_L/\%$	塑限 $w_p/\%$	塑性指数	颗粒组成/%		
							砂粒	粉粒	粘粒
62	1.793	2.65	5.16×10^{-7}	54.5	26.6	28	0	27.8	72.2

具体试验步骤如下:

(1)在模型箱出水口位置粘贴滤膜,固定电极并连接导线、电源、电脑和电势采集盒;

(2)分层装填土样,插入电势探针,称量空烧杯质量,并在出水口放置烧杯;

(3)打开电源以及电脑数据采集软件,调节电源至输出电压 30 V;

(4)每隔相应时间读取电流表示数,称量并计算电渗排水量;

(5)试验结束后,断开电源,取样测含水率,测定抗剪强度,拆除装置。

3 试验结果分析

3.1 排水量与排水速率

图 5 描述了排水量随时间的累积曲线,以 T1 排水速率接近 0 时作为终止条件。从图中可以看出各组试验运行 150 h 时, T1、T2、T3 三组电渗试验排水量分别是 5 223、6 114、7 219 mL。排水累积曲线大致可分为三个阶段,前 20 h 曲线呈线性增长阶段;从 20~140 h 左右,曲线逐渐平缓,排水速率逐渐下降,处于排水衰减期;140 h 以后排水速率逐渐趋向于 0,排水量几乎不再增加。T2 与 T1 相比,明显地看出相对于传统的单管电极,增加一层横向排水通道后,T2 前两个阶段的排水速率更高,最终排水量增长 17%左右,说明横向排水路径的增加以及阳极到阴极排水距离缩短对于电渗排水的促进效果明显。进一步对比 T3 与 T2 发现,T3 相较于 T2 试验效果提升明显,无论是排水速率还是最终的排水量都领先于单层电极排水电极,提高 18%左右。从利于排水的角度来看,双层式立体排水电极结构更加合理,相对于传统单管电极提升 38%,土体的排水更加高效。

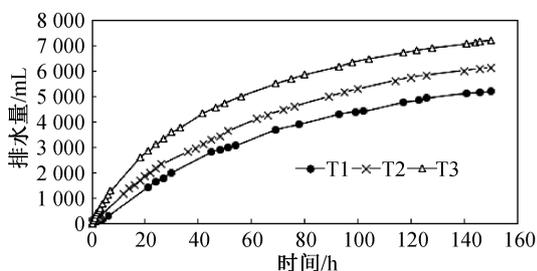


图 5 排水量随时间变化曲线

Fig. 5 Drainage curve with time

3.2 含水率与抗剪强度

电渗处理后土体的剪切强度和含水率将直接影响到电渗处理技术的实际应用,试验后的试样

剪切强度用十字板剪切仪测定,含水率测点布置与抗剪强度测点一样,如图 4 所示。在阴阳两极附近、阴阳极连线中点(中点)以及阳极与阴极(阴极与阳极)连线中点处(中心),从上到下按照表层、中间层、底层取样测试。最后,每个部分的剪切强度和含水率取其平均值,如图 6 和图 7 所示。

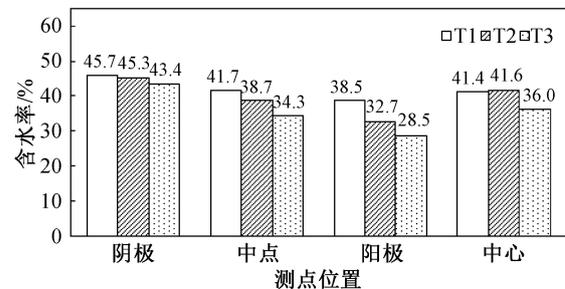


图 6 试验后含水率变化柱形图

Fig. 6 Column chart of water content change after test

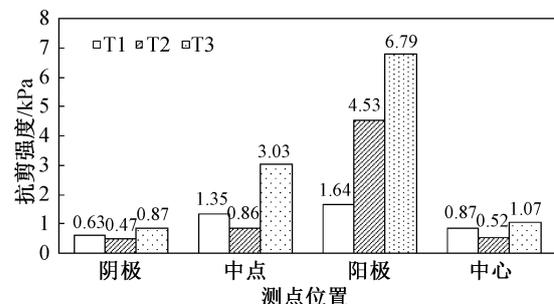


图 7 试验后抗剪强度变化柱形图

Fig. 7 Column chart of shear strength after test

由图 6 和图 7 可知,抗剪强度的增加与含水率的降低呈正相关,分别在阳极和阴极处获得了它们的最大值和最小值。T1—T3 各组试验最低含水率均出现在阳极附近,其中最小值为 T3 试验组的 28.5%,相比原始含水率降低百分比达 54%。T1—T3 三组试验呈现明显的强度梯度划分, T3>T2>T1,增加横向排水体后对于土体强度的增加效果比较明显。抗剪强度最大值均出现在阳极附近,其中最大值为 T3 试验组 6.79 kPa,最小值出现在 T2 试验组的阴极处为 0.47 kPa。除此之外,对比 T1—T3 阴极附近和中心点可以发现,中心点和阴极点抗剪强度差异很小。阴极由于是水流的汇集和排水处,水分难以完全排出,造成强度较低;中心位置由于四处水分汇聚,强度虽然比阴极要高,但远远不如阳极。

试验各组含水率和强度对比如表 3 所示,忽略各点含水率的差异整体分析,T1、T2、T3 相比于原始土样的含水率分别下降了 32.5%、36.1%、42.6%,横向排水体的增加使得含水率呈现阶梯式

表3 试验各组合含水率和强度对比表
Tab.3 Comparison table of water content and strength of test groups

测试项	计算内容	T1	T2	T3
含水率	平均值/%	41.8	39.6	35.6
	降低比/%	32.5	36.1	42.6
	变异系数	0.07	0.12	0.17
抗剪强度	平均值/kPa	1.12	1.60	2.94
	提升倍数	4.1	6.3	12.4
	变异系数	0.41	1.23	0.93

降低,说明横向排水体的存在对于含水率的降低有重要的影响。而对于土体抗剪强度来说,增加横向排水体后,T2、T3 相比于 T1 提升明显,是 T1 的 1.5 倍和 3.0 倍,相较于含水率降低程度的 1.1 倍和 1.3 倍,增加横向排水体后,对于土体强度的提升更为明显。另外对比 T2 和 T3,增加一层排水体土体含水率变异系数由 1.23 降至 0.93,强度均匀性也更好,说明其双层式结构更为合理。

3.3 沉降变化

图 8 显示了各组试验沉降情况,T1—T3 试验沉降最小的位置都在阳极附近,沉降最小值 1.5 cm 位于 T3 的阳极,沉降最大值 3.05 cm 发生在 T1 单元体中心处。按照电渗排水固结的机理,阳极水分迁移至阴极排出使阳极附近土体发生固结沉降,阳极附近的土体的含水率是最低的,排水量是最大的,沉降理论上应该达到最大值,但是实际结果阳极沉降并不是最大值,甚至都达不到阴阳极中间的值。试验出现的这种现象,本文认为导致阳极沉降值没有达到理论数值是因为立体排水-电极结构体的存在,在阳极附近搭建一个固定的骨架,这个骨架给阳极附近土体提供一个支撑作用,阻止了阳极附近的沉降;另外,土体阳极表层随着排水的不断进行,在阳极排水体附近形成土桩,使附近土体表面隆起,进一步使阳极沉降降低。至于沉降最大处在正方形中心也是预期之中,因为中心点的土体可以同时向周围的排水体进行排水,排水路径最短也最多,而在阴阳极中间处,由于距离另一个阴极较远,实际上可考虑为单一排水路径。

3.4 电势分布及其变化

针对本文中立体排水-电渗联合体来说,横向排水体的增加势必会影响其分布,因此不采用传统从阳极到阴极间隔电势测针布置方案。而是在

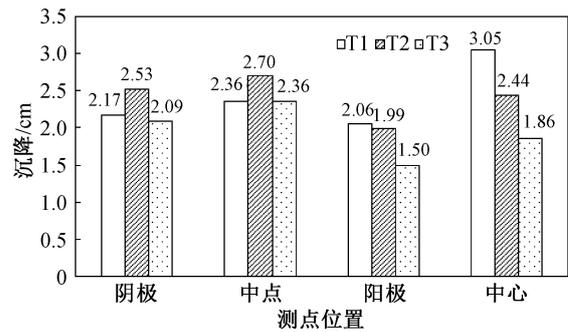


图8 试验后沉降变化柱形图

Fig. 8 Column chart of settlement change after test

阴阳两极附近、阴阳极连线中点(中点)以及阳极与阳极(阴极与阴极)连线中点处(中心)四个位置,在中间层设置探针。由于试验仪器故障,阳极附近电势数据丢失,在此仅对位于阴极附近、阴阳极中点、中心点进行分析。具体的电势随时间变化的情况见图 9。

从整体来看,在阴阳极中点以及中心处,在后期单管电极的电势会明显小于单层和双层电极,而单层和双层电极在这两处基本上电势处于同一梯度水平,没有明显高低,说明横向排水体的加入使得电势会保持在一个相对较高的水平,相较于单管电极,立体电渗排水体对于中部的土体有着更好的加固作用。

从阴极处的电势变化来看,由于双层电极组测点距离阴极处电极距离较近的原因,使得双层电极明显小于另外两组,阴极处电势低说明水分排出及时,而且阴极处保持一个较低的电势会使得土体中部的电势梯度维持一个较高的水平,有利于电渗的持续高效进行。

3.5 电流变化与能耗分析

图 10 显示了电流强度随时间的变化。T1—T3 三组试验早期电流略有提高,考虑是电渗初期土体内部水分从阳极向阴极迁移,增大了土体水的流动性,使得电阻减小电流增大。对比 T3 与 T2 发现,双层式联合体电流始终高于单层式联合体,增加横向排水体的数量有利于土体维持较高的电水平,说明增加排水通道缩短排水路径后可以促进土体中水分子运动,对立体排水-电极联合体的结构改进有一定的启示。而对 T2 与 T1 电渗作对比,发现差异不是很明显,只是在电渗初期含水率略高于单管电极,在这之后基本处于同一水平,呈现出随时间的增加逐渐递减并最后趋于稳定的规律。

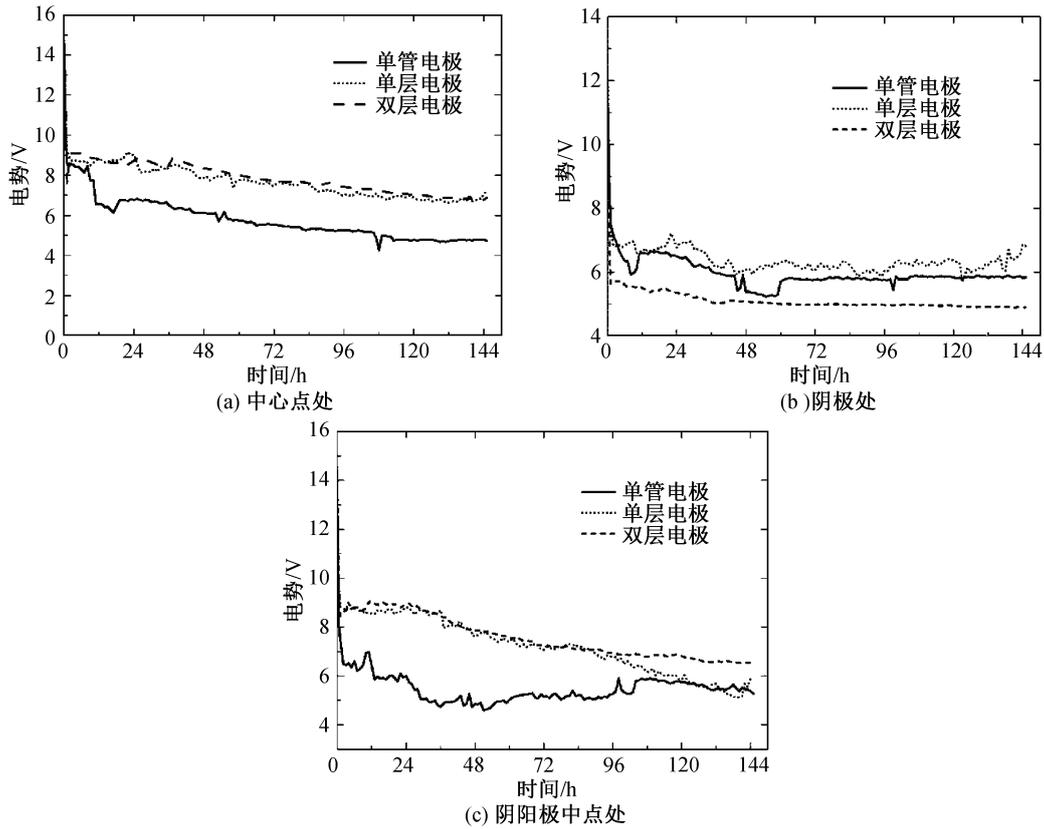


图9 电势随时间变化曲线

Fig. 9 Potential versus time curve

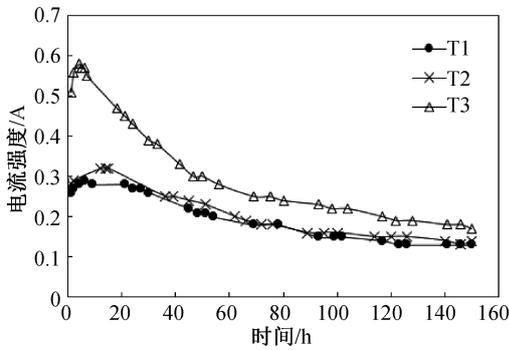


图10 电流强度随时间变化曲线

Fig. 10 Curve of current intensity with time

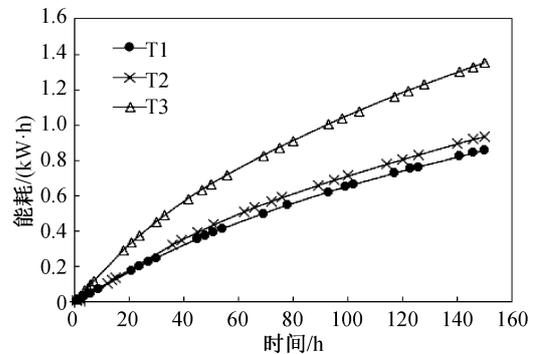


图11 各组试验累积能耗

Fig. 11 Cumulative energy consumption of each test group

能耗过高是影响电渗排水固结广泛应用的主要因素之一。有研究表明,电渗中用于排水的能耗远低于使土体发热所用的能耗,有效降低能耗问题亟待解决。本文采用稳压输出,试验能耗的计算主要基于电流变化的情况,所用公式如下:

$$W_i = \int_{t_0}^{t_1} UI_i dt \quad (1)$$

式中: I_i 表示在 t_0 和 t_1 之间的平均电流; U 为定值,电压在整个试验过程中控制为定量; W_i 表示在 t_0 和 t_1 之间的能耗。

分段计算出各段能耗以后,分段累加直至试验结束得到最终能耗。图11为试验各组能耗的累积曲线图,T1—T3的最终能耗分别为0.85、0.94、1.35 kW·h。增加横向排水体后,特别是双层式立体排水-电极联合体试验的能耗有明显的增加,但电流的强度也有一个较高的提升,电流增大意味着排水的能力更强,体现出双层立体排水的优势。

为了更好地对比各组的情况,引入统一能耗系数概念,其公式为:

$$C = \frac{\int_{t_0}^{t_1} UI_t dt}{Q_t} \quad (2)$$

Q_t 表示从 t_0 和 t_1 之间的累积排水量, C 的单位为 $\text{kW}\cdot\text{h}/\text{L}$, 物理意义为排出 1 L 水所需要耗费的能量。以 150 h 作为终止时间, 对各组进行分别求解, 得出 T1—T3 的能耗系数分别为 0.163、0.154、0.187。T2 与 T1 相比, 增加横向排水体后, 能耗系数反而降低, 考虑排水量体现了立体排水-电极联合体的优越性。而对于双层电极来说其能耗之所以大, 是因为增加横向排水通道之后其与土体接触面积变大, 且电极在试验过程中相比单管以及双管电极与土体结合更紧密, 有效电压更高, 故其能耗相对较高。综合来看从排水量、土体处理后强度等方面来看, 虽然能耗有所增加, 但立体排水-电极联合体这种新结构还是具有一定的优势与应用前景。

4 结论

1) 立体排水-电极联合体增加了横向排水通道, 缩短了排水固结排水路径, 排水量以及排水速率均优于传统竖向排水体, 单层式联合体后比传统竖向排水体排水量增大 17%, 双层式联合体后比传统竖向排水体排水量进一步增大到 38%, 新型结构设计合理。

2) 从土体强度增长来看, 增加横向排水体后提升明显, 是传统竖向单管电极的 1.5 倍和 3.0 倍, 相较于含水率降低程度的 1.1 倍和 1.3 倍, 对于土体强度的提升更为明显, 并且双层式联合体处理后抗剪强度变异系数仅有 0.93, 土体内部强度更加均匀。

3) 针对立体排水-电极联合体空间布置的情况, 发现可以使土体中部的电势梯度维持一个较高的水平, 有利于电渗的持续高效进行。经济上引入了统一能耗系数的概念, 可以看到双层式联合体能耗系数是传统竖向排水体的 1.15 倍, 但综合土体处理效果来看, 认为立体排水-电极联合具有良好的应用前景。

参考文献:

- [1] CASAGRANDE L. Electro-Osmosis in Soil[J]. Geotechnique, 1949(1): 159-177.
- [2] BJERRUM, LAURITS. Engineering Geology of Norwegian Normally-Consolidated Marine Clays as Related to Settlements of Buildings[J]. Geotechnique, 1967, 17(2): 83-118.
- [3] 庞宽, 刘斯宏, 吴澎, 等. 电渗法加固软土地基基本参数室内试验研究[J]. 水运工程, 2011, 000(003): 148-153.
- [4] 庄艳峰. 电渗排水固结的设计理论和方法[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(0z1): 152-155.
- [5] 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(03): 319-322.
- [6] 龚晓南, 焦丹, 李瑛. 粘性土的电阻计算模型[J]. 沈阳工业大学学报, 2011, 33(02): 213-218.
- [7] 焦丹, 龚晓南, 李瑛. 电渗法加固软土地基试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011(S1): 3208-3216.
- [8] 潘冬庆, 邓安, 周亚东. 电渗过程中电极与土体间电荷积累问题研究[J]. 水电能源科学, 2013, 031(005): 223-226.
- [9] LEFEBVRE G, BURNOTTE F. Improvements of Electro-osmotic Consolidation of Soft Clays by Minimizing Power Loss at Electrodes[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2002, 39(2): 399-408.
- [10] LAURSEN S. Laboratory Investigation of Electroosmosis in Bentonites and Natural Clays[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1997, 34(5): 664-671.
- [11] 孙益成, 杨建贵, 李琦梦, 等. 非饱和土电渗加固的试验研究[J]. 科学技术与工程, 2016, 016(021): 307-312.
- [12] 王柳江, 刘斯宏, 朱豪, 等. 电极布置形式对电渗加固软土效果的影响试验[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2013, 41(001): 64-69.
- [13] 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.
- [14] 张雷, 王宁伟, 景立平, 等. 电渗排水固结中电极材料的对比试验[J]. 岩土力学, 2019(9): 3493-3501.

(责任编辑 王利君)