

# 电渗-包裹碎石桩布置形式对软土加固效果影响的模型试验研究

张康<sup>1,2</sup>, 郑凌透<sup>2,3</sup>, 赵团芝<sup>4</sup>, 谢新宇<sup>1,5</sup>

(1. 浙江大学滨海和城市岩土工程研究中心, 浙江 杭州 310058; 2. 浙大宁波理工学院, 浙江 宁波 315100;  
3. 浙江大学宁波研究院, 浙江 宁波 315100; 4. 宁波市自然资源生态修复和海洋管理服务中心, 浙江 宁波 315042;  
5. 浙江大学温州研究院, 浙江 温州 325035)

**摘要:** 为了提高包裹碎石桩复合地基承载力, 提出利用电动土工织物作为碎石桩包裹套筒与电渗法联合处理的方法。同时为了探究电渗-包裹碎石桩处理软土工艺参数的影响, 进行了两类电极布置形式(一字型、三角形)下的室内电渗模型试验, 一字型布置设置3种电势梯度(0.2 V/cm, 0.4 V/cm, 0.6 V/cm), 三角形布置分别设置阴阳极数目为1:2、2:1, 获取电渗排水、通电电流、电渗结束后土体抗剪强度等试验结果。通过分析能耗系数变化规律和土体加固机理, 研究电势梯度及包裹碎石桩布置形式对电渗-包裹碎石桩联合方法在软土地基加固中的影响。结果表明, 能耗系数随电势梯度的增加而增大, 电势梯度为0.2 V/cm时总体能耗系数较低且最终排水量大, 工程中不宜选用过高电势梯度。联合方法对于桩周土处理效果较好, 阳极区域附近土体抗剪强度提高主要由电渗作用引起, 且沿深度方向衰减; 阴极区域附近土体抗剪强度主要由排水体作用引起, 距排水口越近加固效果越好。

**关键词:** 地基加固; 联合方法; 电势梯度; 能耗系数; 包裹碎石桩

中图分类号: TU47

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2023)02-0105-08

## Experimental study of arrangement type on the reinforcement effect of electric geotextile-encased stone columns in soft soil

ZHANG Kang<sup>1,2</sup>, ZHENG Ling-wei<sup>2,3</sup>, ZHAO Tuan-zhi<sup>4</sup>, XIE Xin-yu<sup>1,5</sup>

(1. Research Center of Coastal and Urban Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, Zhejiang, China;  
2. NingboTech University, Ningbo 315100, Zhejiang, China; 3. Ningbo Research Institute, Zhejiang University, Ningbo 315100, Zhejiang, China;  
4. Ningbo Administration and Service Centre for Marine and Ecological Restoration of Natural Resources, Ningbo 315042, Zhejiang, China;  
5. Wenzhou Research Institute, Zhejiang University, Wenzhou 325035, Zhejiang, China)

**Abstract:** To improve the bearing capacity of geosynthetic encased stone column (GESC) composite foundation, a combined method of electro-osmotic with electric geotextile as wrapping sleeve of GESC was proposed. Meanwhile, to explore the influence of the processing parameters in electro-osmosis combined with GESC on soft soil, indoor model tests at the laboratory scale with two types of electrode arrangement (line type and triangle type) were carried out. Three potential gradients (0.2 V/cm, 0.4 V/cm, 0.6 V/cm) were set for the line type arrangement, and the number of cathodes and anodes was set to 1:2 and 2:1 for the triangle type. The test results of drainage volume, electrified current, soil shear strength after the electro-osmotic process were obtained. The influence of the electric potential gradient and arrangement on the combined method was studied by analyzing the variation in the energy consumption coefficient and soil reinforcement mechanism. The results show that the energy consumption coefficient increases with increasing potential gradient. When the potential gradient is 0.2 V/cm, the overall energy consumption coefficient is low and the final discharge is large. So, it is not suitable to use a high potential gradient in engineering. The combined method has a good effect on the treatment of soil around the pile. The increase in the shear strength of the soil near the

anode area is mainly caused by electro-osmosis and decays along the depth. The shear strength of the soil near the cathode area is mainly caused by the action of drainage water, and the closer to the drainage outlet, the better the reinforcement effect.

**Key words:** ground improvement; combined method electric; electric potential gradient; energy consumption coefficient; geotextile encased stone column

## 0 引言

电渗法可用于处理低渗透性和高含水量软土。自 1939 年 CASAGRANDE<sup>[1]</sup> 第一次成功将电渗法应用于工程中, 越来越多的机构对电渗加固地基领域进行了研究。关于电渗加固软土的影响因素研究主要集中在土体特性<sup>[2-3]</sup>、通电形式<sup>[4-6]</sup>、电极布置形式<sup>[7-9]</sup>、电极材料和联合工法等方面。

在电极布置形式方面, GLENDINNING 等<sup>[10]</sup> 采用含导电元素的高分子材料研制电动土工合成材料 (Electrokinetic Geosynthetics, EKG), 通过比较长方形和梅花形两种电极布置形式减少污泥体积的效果, 证明梅花形布置在处理用时和能耗上更优。李一雯等<sup>[11]</sup> 研究了长方形、梅花形和平行错位 3 种不同电极布置形式对电渗排水效果的影响, 结果显示电极平行错位布置形式排水效果最佳、能耗系数表现最好。在电极材料方面, 陶燕丽等<sup>[12]</sup> 提出电化学钝化现象, 指出该现象会大幅降低电渗效率。庄艳峰<sup>[13]</sup> 认为 EKG 材料的出现解决了电极腐蚀和电渗能耗过高的问题。HU<sup>[14]</sup> 分析研究与电渗结合使用的最佳土工合成材料, 认为用于 EKG 导电细丝的材料中, 碳具有最佳的耐腐蚀性。为了提升电渗法的加固效果, 工程中还提出了电渗联合工法。如符洪涛等<sup>[15]</sup> 通过低能量强夯联合电渗法室内模型试验, 证明低能量强夯重点施加于阳极区土体开裂处可以提高实际工程中的加固效果。孙召花等<sup>[16]</sup> 认为真空预压与电渗异步加固能够获得比其他联合方式更好的加固效果。电渗法联合其他工法被证明是在目前阶段较为快捷提升地基处理效果的一种解决方案。

包裹碎石桩 (Geosynthetic-Encased Stone Columns) 概念由 VAN<sup>[17]</sup> 首次提出并应用于地基处理, 它是在碎石桩外包裹一层土工织物以提供径向约束作用, 可用于加固抗剪强度低的软土。MURUGESAN 等<sup>[18]</sup> 通过模型试验研究了不同土工织物套筒下包裹碎石桩的承载变形特点, 认为包裹碎石桩轴向承载力的增加很大程度取决于套筒的强度和碎石桩桩径。赵明华等<sup>[19]</sup> 和欧阳芳等<sup>[20]</sup>

通过进一步的研究探讨了包裹碎石桩的承载和变形机理。现阶段电动土工织物用于电渗处理软土地基已有相关应用, 但作为碎石桩套筒用于包裹碎石桩-电渗联合地基处理方法研究较少。

本文采用自行研制的电动土工织物作为碎石桩套筒, 使包裹碎石桩体成为电渗阴阳极, 开展了电渗-包裹碎石桩联合方法室内试验。选择电势梯度和阴阳极桩布置形式作为变量, 设计了两类不同电极布置形式共 6 组模型试验, 获得排水量、通电电流、能耗系数、抗剪强度等试验结果, 探讨分析不同工况下能耗系数变化、土体加固机理情况, 为进一步现场试验及应用提供参考。

## 1 模型试验设计

### 1.1 模型相似关系

本模型试验中重点研究电渗-包裹碎石桩联合方法中电渗排水问题, 影响土体排水加固、能耗系数的主要因素包括土体特征尺寸  $L$ 、电极间距  $L_e$ 、外加电势梯度  $G$ 、密度  $\rho$ 、弹性模量  $E$ 、土的电导率  $\sigma_e$ 、电渗透系数  $k_e$ 、水力渗透系数  $k_h$ 、含水量  $w$ 、泊松比  $\nu$ 、孔隙比  $e$ 、相对密度  $G_s$ 、排水量  $Q_e$ 、排水速率  $q_e$ 、电渗流速  $v_e$ 、通电电流  $I$ 、电渗运移量  $W$ 、能耗系数  $C$ 、处理时间  $T$ 。根据相似理论原理<sup>[21-22]</sup>, 以  $L$ 、 $T$ 、 $I$ 、 $G$  为基本量进行无量纲化处理, 得到相似准则方程:

$$f\left(\frac{L_e}{L}, \frac{Q_e}{L^3}, \frac{q_e}{L^3 T^{-1}}, \frac{k_h}{L T^{-1}}, \frac{\rho}{G I L^{-4} T^3}, \frac{E}{G I L^{-2} T}, \frac{k_e}{G^{-1} L T^{-1}}, \frac{v_e}{L T^{-1}}, \frac{W}{I^{-1} L^3 T^{-1}}, \frac{\sigma_e}{G^{-1} I L^{-2}}, \frac{C}{G I L^{-2} T}, w, \nu, e, G_s\right) \quad (1)$$

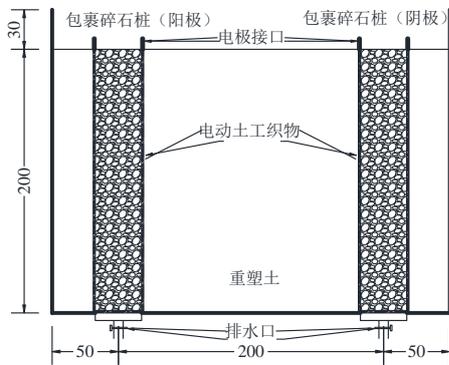
综合考虑试验条件及试验操作的可行性, 模型试验中保证土体  $G$ 、 $\rho$ 、 $E$  和  $k_e$  与原型土一致, 几何相似比、电流相似比和时间相似比均取  $\beta=b/B$  (模型/原型)。为满足模型试验与原型的相似, 各物理参量需满足表 1 所示的相似比关系。

根据相似比分析结果, 模型试验材料密度  $\rho$ 、弹性模量  $E$  需要与原型材料一致, 模型土体电导率可以通过增加土体含盐量的方式改变<sup>[23]</sup>, 满足相似比关系。

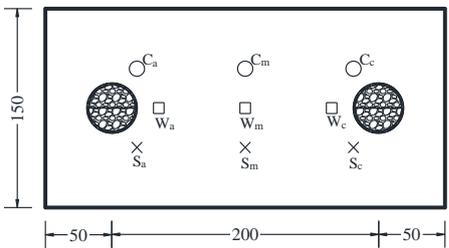
1.2 试验设计

本次试验采用有机玻璃模型箱进行电渗模型试验, 模型试验箱的尺寸为 300 mm (长) × 150 mm (宽) × 230 mm (高), 试验布置及测点布置图见图 1。包裹碎石桩尺寸及布置形式参考工程实例<sup>[24]</sup>, 本次试验中相似比取  $\beta=1/20$ , 模型试验设计包裹碎石桩直径为 35 mm, 桩长 200 mm。为满足土的电导率  $\sigma_e$  是现场土体的 20 倍, 需要在试验用土中加入盐溶液提高电导率<sup>[25-26]</sup>。试验共设计了 6 组, 其中 4 组中有 1 组重力排水试验 (编号 A0) 和 3 组不同电势梯度试验 (编号 A1-A3)、2 组不同阴阳极桩数试验 (编号 B1、B2), 见表 2。

单位: mm



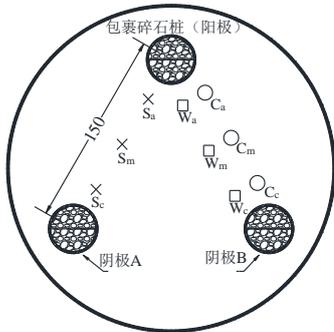
(a) A 组试验装置剖面图



× 抗剪强度测点 (Sa、Sm、Sc 分别代表阳极区域附近、中点、阴极区域附近抗剪强度测点)

○ 承载力测点      □ 土体含水率测点

(b) A 组试验测点布置图



(c) B 组试验装置及测点布置图

图 1 试验装置及测点布置图

Fig. 1 Layout of test device and measuring points

表 1 模型参数的相似比

Table 1 Similarity ratio of model parameters

物理量	相似比	物理量	相似比
$L_e$	$\beta$	$\rho$	1
$I$	$\beta$	$E$	1
$T$	$\beta$	$k_e$	1
$Q_e$	$\beta^3$	$v_e$	1
$k_h$	1	$W$	$\beta$
$q_e$	$\beta^2$	$\sigma_e$	$\beta^{-1}$
$C$	1	$e$	1
$w$	1	$G_s$	1
$v$	1	—	—

表 2 试验分组情况

Table 2 Details of tests

试验编号	电极间距 $L/cm$	电势梯度 $G/(V/cm)$	阳极桩数	阴极桩数
A0	20	0.0	1	1
A1	20	0.2	1	1
A2	20	0.4	1	1
A3	20	0.6	1	1
B1	15	0.6	2	1
B2	15	0.6	1	2

1.3 试验材料

(1) 地基土

试验用土取自温州市茶白片区梧田南单元 B-10 地块, 软土物理参数如表 3 所示。

(2) 桩体材料

桩体材料采用粒径为 3~6 mm 的碎石, 制作模型桩的桩体密度控制为  $\rho=1.75 \text{ g/cm}^3$ 。

(3) 电动土工织物

碎石桩外裹电动土工织物, 织物由涤纶与碳纤维按 1:1 比例编织而成。试验中圆形套筒直径与桩径一致, 接缝处搭接段长度为 50 mm, 搭接段沿套筒纵向缝合两道, 缝制线与套筒材料强度一致。

1.4 试验过程

(1) 制备土样及填土

试验前将原状土烘干、粉碎、加水并加 NaCl 搅拌调制成初始含水量为 65% 的重塑土。为保证土体电导率为原型的 20 倍, 需使土体含盐量为 28 g/L, 该数值经由自制的 Miller Soil Box 中利用直流四相电极法测量不同电势梯度和含盐量下电导率验证确定<sup>[27]</sup>。之后将重塑土分层填入模型试验箱, 高度 200 mm。装填完毕后用保鲜膜封闭以减少水分蒸发。

表3 软土物理参数  
Table 3 Properties of soft soil

土层	天然含水量/%	密度/(g/cm <sup>3</sup> )	土粒比重 G <sub>s</sub>	天然孔隙比 e	液限 ω <sub>L</sub>	塑限 ω <sub>P</sub>	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
淤泥	63.8	1.60	2.68	1.755	50.6	27.1	7.6	8.9

## (2) 模拟成桩

淤泥层填筑过程中需先将钢护筒垂直放置于模型箱中, 分层加入重塑土直至填土完成。之后将事先缝制好的电动土工包裹套筒中加入碎石, 达到指定桩体高度及密度, 放入钢护筒内, 边上拔边压实直至钢护筒全部拔出, 使桩体紧贴土体。

## (3) 通电及测量

成桩完成后保持试验箱在恒温环境, 各组试验在通电前静置 6 h, 使土体在重力作用下密实并与电动土工织物包裹套筒接触良好。之后接通电源并记录排水量、电流等数据, 试验电源采用 HSPY-60-02 直流电源, 最高提供 60 V 输出电压和 2 A 输出电流。通电结束后按照图 1 测点位置测量相应数据, 土体最终含水量使用烘干法测量, 土体抗剪强度由 SZB-1.0 型便携式十字板剪切仪测量。

## 2 试验结果及分析

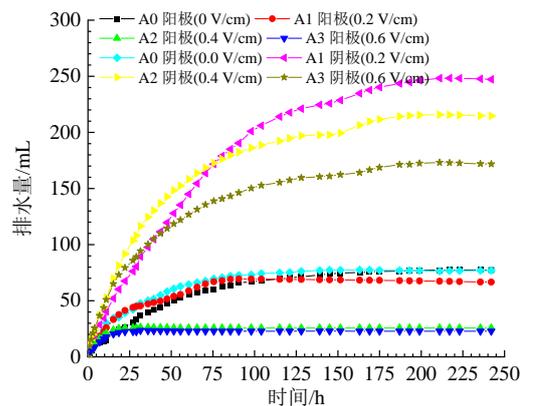
### 2.1 排水量及土体最终含水量

电渗的排水量是评价电渗排水效果最为直观有效的数据, 也是后期计算能耗系数的重要部分。通过在阴阳极排水口放置烧杯收集各组试验排水量, 分别绘制 A 组和 B 组排水量随时间变化曲线, 如图 2 所示。其中, B 组中单位阴(阳)极排水量为阴(阳)极平均排水量。

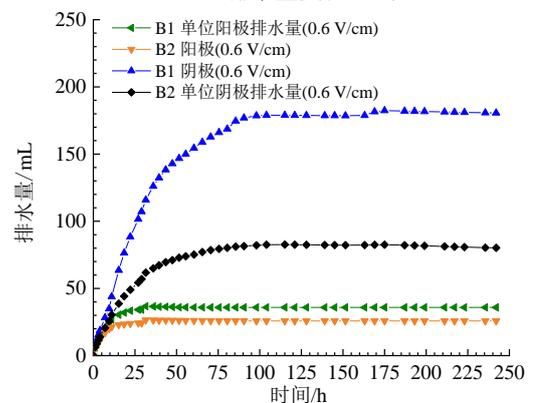
图 2(a) 显示: A2 与 A3 组的阳极排水量几乎一致, 均明显低于对照组 A0, A1 组降低值较小, 原因是在电渗作用下, 阳极排水量会减小, 电势梯度越大阳极排水量越低, 但电势梯度的持续增大对阳极排水量的降低量影响有限。在电渗前期(0~30 h)阶段, 阴极排水量随电势梯度的提高而增加; 在电渗中期(30~75 h)阶段, A2 组排水量最大, A3 组排水速率急剧衰减; 在电渗后期阶段, A1 组最终排水量最大。出现上述现象的原因是由于 A3 组前期较快的电渗排水速率, 导致土体形成较大裂隙, 土体电阻增加伴随着电流急速下降, 使中后期阶段电渗效果大幅度衰减。A1 组起始电势梯度较低, 较低的电渗排水速率形成更稳定、均匀的土体加固结果, 最终排水量最高。A2 组电势梯度介于 A1 与 A3 之间, 前中期排

水量主要影响因素为电势梯度, 后期排水量减少则是由于土体电阻增大导致。

图 2(b) 显示: 在 B 组实验中, 阳极排水由于电渗作用的存在均会减小。B1 阴极排水量多于 B2 组, 这是因为 B1 组阳极数量较 B2 组多, 电渗带动阳极水往阴极移动能力越强, 土体排水越多。



(a) A 组排水量变化曲线



(b) B 组排水量变化曲线

图 2 排水量随时间变化曲线

Fig. 2 Variation of drainage volume with time

在电渗作用下土体排水, 使得土体含水量发生变化, 从而提高地基允许承载力和抗剪强度。在本次试验中, 试验结束后分别在土体表面、75 mm 深度处和 150 mm 深度处不同位置(W<sub>a</sub>: 阳极附近; W<sub>m</sub>: 中点; W<sub>c</sub>: 阴极附近)取土样用烘干法测量其含水量, 绘制土体最终含水量变化曲线, 如图 3 所示。

图 3 显示: 各组试验中阳极附近和中点含水量降低值均随深度减小, 阴极附近含水量降低值随深度先减小后增加。在 A 组中, A2 组各位置含水量降低值多于其他组, A1 组中间位置含水量降

低值低于阳极和阴极区域, 这是因为电渗作用下土体水分从阳极向阴极方向移动<sup>[4]</sup>, A1 组电势梯度较小, 电渗作用引起的水体运移速度较慢, 阴极可以及时将运移到阴极的孔隙水排出, 从而形成含水量中间高两端低的现象。在 B 组中, B1 组整体含水量降低值比 B2 组大, 在 150 mm 处与 B2 组趋势不同, 这是因为 B1 组阳极数量多, 阳极数量的增加会使土体整体加固更加均匀。沿深度方向, A、B 两组中阳极和中间区域含水量降低值均呈现降低的趋势, 阴极附近 150 mm 深度处含水量降低值相对于阴极附近 75 mm 深度处更明显。

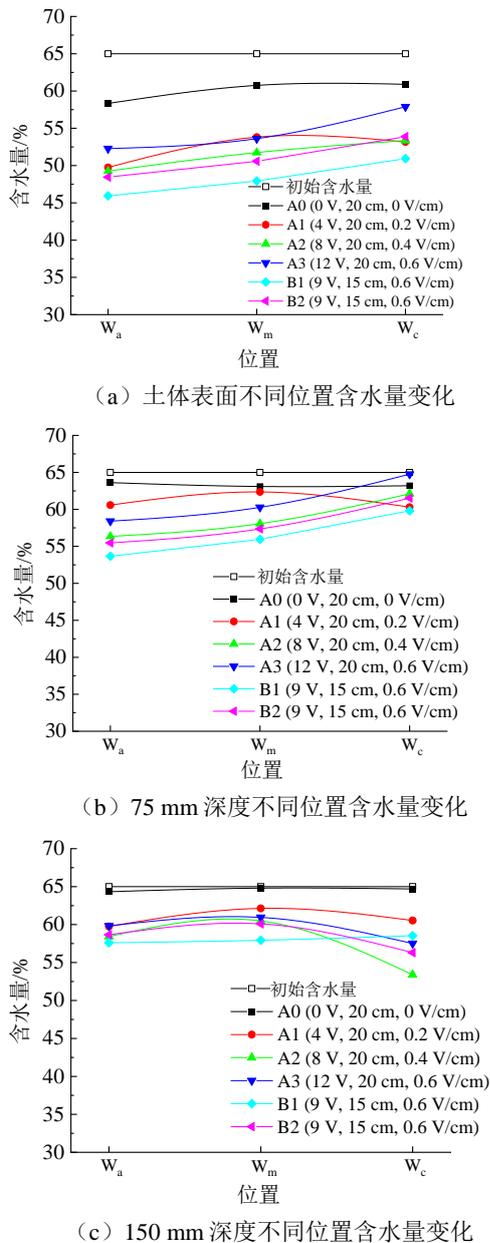


图 3 土体最终含水量分布曲线

Fig. 3 Final water content distribution of soil

### 2.2 通电电流

电渗过程中的通电电流反应土体中离子的迁

移和能耗系数情况, 对电流的观测是电渗排水实验中的重要部分。本次试验中通过直流电源记录电流值, 绘制电流值随时间变化曲线, 如图 4 所示。

图 4 显示两组试验的通电电流曲线在电渗前期 (0~30 h) 阶段区分明显。在 A 组中, 电渗前期电势梯度越高, 通电电流值越高, 但中后期衰减越快; 在 B 组中, B1 组整体电流值相较于 B2 组高。电流值随通电时间的变化分为两个阶段, 第一阶段, 电流值随着通电时间的持续而呈现增长的趋势, 原因是电荷重分布弱化土体电阻的影响<sup>[28-29]</sup>; 第二阶段, 电流值随着通电时间的持续而不断降低, 原因主要是电极与土体接触面的界面电阻不断增大。

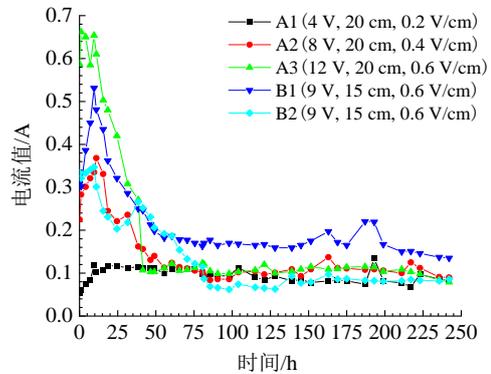


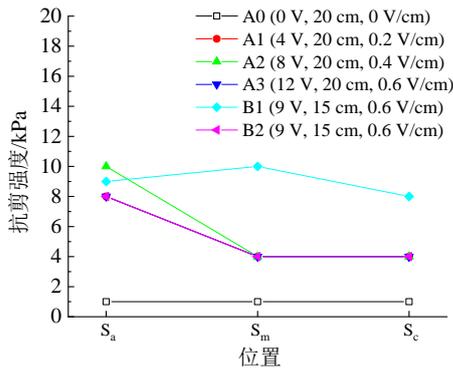
图 4 电流值随时间变化

Fig. 4 Variation of electric current with time

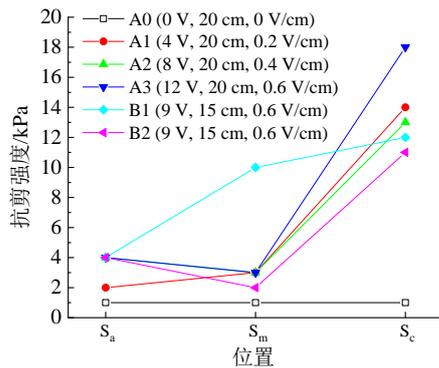
### 2.3 抗剪强度及承载力

电渗作用通过排水固结来提高土体抗剪强度, 从而提高地基承载力以满足工程应用的需要, 所以土体抗剪强度是衡量电渗加固土体效果的重要指标。本次试验中采用十字板剪切仪测量不同位置处抗剪强度, 绘制土体抗剪强度变化曲线, 如图 5 所示。试验开始前重塑土初始抗剪强度几乎为 0。

图 5 显示在 A 组中, 土体表面阳极附近抗剪强度 A1 和 A3 组相比于对照组 A0 提高 8 倍, A2 组提高显著, 为 10 倍, 阳极附近土体抗剪强度增加比阴极附近显著。随着深度的增加, 在 100 mm 深度处阳极附近抗剪强度提高效果有所衰减, 而阴极附近提高显著, 原因是在阴极附近, 碎石桩周围形成排水加固区, 增加了阴极附近周围土体抗剪强度。在 B 组中, B1 组土体抗剪强度整体比 B2 组高, 处理效果更好, 且阴阳极中点处抗剪强度提升明显, 土体加固效果更加均匀。原因是 B1 组阳极数量多, 土体整体处理效果好。



(a) 土体表面不同位置抗剪强度变化



(b) 100 mm 深度不同位置抗剪强度变化

图5 土体抗剪强度分布

Fig. 5 Shear strength distribution of soil

### 3 电渗能耗和土体加固机理分析

#### 3.1 电渗能耗分析

根据图2和图4可知, 各组试验中排水量和电流值曲线在0~100 h 区间段变化明显, 规律性好, 故本次试验采用0~100 h 区间段的排水量和电流值进行电渗能耗分析。

能耗系数由式(2)进行计算<sup>[30]</sup>, 计算A组与B组各组试验的能耗系数, 并绘制能耗系数随时间变化曲线, 如图6所示:

$$C = \frac{\int_{t_1}^{t_2} UI(t)dt}{Q(t_2) - Q(t_1)} \quad (2)$$

式中:  $U$  为电势,  $V$ ;  $Q(t)$  为  $t$  时刻的累计电渗排水量,  $mL$ ;  $I(t)$  为  $t$  时刻的电流,  $A$ ; 能耗系数  $C$  用于表征排出  $1 mL$  水所需消耗的电能,  $W \cdot h/mL$ 。

图6表明在A组中, 能耗系数随电势梯度增加而增大。A2组与A3组能耗系数偏高, A1组能耗系数较小, 处于  $0.02 \sim 0.33 W \cdot h/mL$  范围, 工程中不宜选用较大电势梯度。在B组中, 能耗系数在电渗前期基本相同, 在电渗后期B2组能耗系数由于排水量减少而急剧增加。

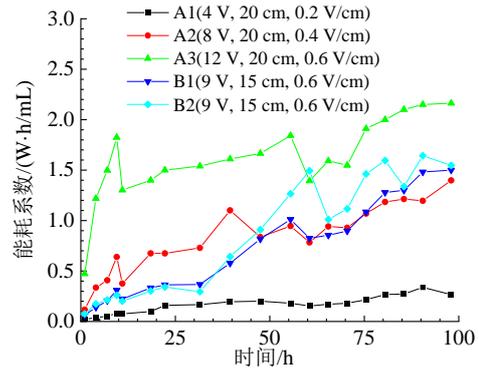


图6 能耗系数随时间变化

Fig. 6 Variation of energy consumption coefficient with time

#### 3.2 土体加固机理分析

本次试验中根据A2组不同位置和深度处抗剪强度值, 使用MATLAB软件绘制土体加固区域分布剖面图, 如图7所示。由图可知, 在阳极区域, 上部区域加固效果提高显著, 加固区随着深度方向衰减; 在阴阳极中点区域, 加固区仅为中上部区域; 在阴极区域, 呈现与阳极区域相反的变化特征, 上部区域加固效果差, 而随着深度增加, 加固效果逐渐提升, 且在排水口区域加固效果最好。原因是在电渗作用下土体电渗加固强度由阳极向阴极逐渐减小, 同时由于有效电势随深度方向不断衰减。在阴极附近中下部区域土体加固是由水位下降产生的堆载效应和负压效应共同产生<sup>[31]</sup>, 阴极作为排水通道, 可以及时快速排除水分, 且距离排水口越近土体加固效果越好。

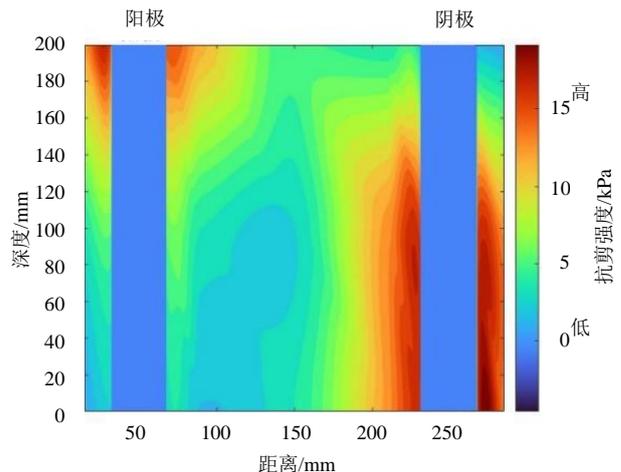


图7 土体加固区域分布剖面图

Fig. 7 Distribution of soil reinforced area

### 4 结论

(1) 在一字型布置试验中, 电渗加固过程可分为3个阶段, 在电渗前期(0~30 h)阶段, 阴

极排水量随电势梯度的提高而增加;在电渗中期(30~75 h)阶段,A2组排水量最大,A3排水速率由于土体裂隙导致土体电阻陡增而急剧衰减;在电渗后期阶段,A1组由于较低的电渗排水速率形成更稳定、均匀的土体加固效果,最终排水量最大。在能耗系数方面,在A组中,能耗系数随电势梯度增加而增大。A2组与A3组能耗系数偏高,A1组总体能耗系数较低,为0.02~0.33 W·h/mL范围内。

(2)在三角型布置试验中,与B2组相比,B1组最终排水量、排水速率及电流值均有明显提高,这说明阳极数量的增多有助于提高电渗-包裹碎石桩联合方法处理软土地基加固效果。两组试验电渗前期阶段(0~30 h)能耗系数较低,在0.06~0.33 W·h/mL范围内,中后期能耗系数有所增加。

(3)在土体加固方面,在阳极区域,抗剪强度和含水量降低值随深度减少,土体加固效果随着深度方向衰减;在阴阳极中点区域,加固区仅为中上部区域且加固效果随深度衰减;在阴极区域,土体加固效果随深度方向加强,中下部区域由于排水加固效果增强,土体加固整体效果较好。

(4)工程中对于含水量适中、易出现裂隙的土质电渗前期应选用较低电势梯度,布置形式上适当考虑增加阳极数量。同时为增加阴极区域强度,应做好阴极排水工作。

## 参考文献

- [1] CASAGRANDE I L. Electro-osmosis in soils[J]. *Geotechnique*, 1949, 1(3): 159-177.
- [2] JONES C J F P, LAMONT-BLACK J, GLENDINNING S. Electrokinetic geosynthetics in hydraulic applications[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2011, 29(4): 381-390.
- [3] ARCHIE G E. The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics[J]. *Transactions of the AIME*, 1942, 146(1): 54-62.
- [4] SHANG J Q, LO K Y, INCULET I I. Polarization and conduction of clay-water-electrolyte systems[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1995, 121(3): 243-248.
- [5] 陈卓, 周建, 温晓贵, 等. 电极反转对电渗加固效果的试验研究[J]. *浙江大学学报: 工学版*, 2013, 47(9): 1579-1584.  
CHEN Zhuo, ZHOU Jian, WEN Xiao-gui, et al. Experimental research on effect of polarity reversal to electro-osmotic[J]. *Journal of Zhejiang University: Engineering Science*, 2013, 47(9): 1579-1584.
- [6] 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.  
GONG Xiao-nan, JIAO Dan. Experimental study on electro-osmotic consolidation of soft clay under intermittent current condition[J]. *Journal of Central South University: Science and Technology*, 2011, 42(6): 1725-1730.
- [7] ALSHAWABKEH A N, GALE R J, OZSU-ACAR E, et al. Optimization of 2-D electrode configuration for electrokinetic remediation[J]. *Journal of Soil Contamination*, 1999, 8(6): 617-635.
- [8] GLENDINNING S, LAMONT-BLACK J, JONES C, et al. Treatment of lagooned sewage sludge in situ using electrokinetic geosynthetics[J]. *Geosynthetics International*, 2008, 15(3): 192-204.
- [9] 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(1): 64-69.  
WANG Liu-jiang, LIU Si-hong, ZHU Hao, et al. Experimental study of effects of electrode configuration on electroosmosis reinforcement for soft soil[J]. *Journal of Hohai University: Natural Science*, 2013, 41(1): 64-69.
- [10] GLENDINNING S, LAMONT-BLACK J, JONES C J F P. Treatment of sewage sludge using electrokinetic geosynthetics[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, 139(3): 491-499.
- [11] 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.  
LI Yi-wen, ZHOU Jian, GONG Xiao-nan, et al. Experimental research on influence of electrode array on electroosmotic effect[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34(7): 1972-1978.
- [12] 陶燕丽, 周建, 龚晓南, 等. 铁和铜电极对电渗效果影响的对比试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2013, 35(2): 388-394.  
TAO Yan-li, ZHOU Jian, GONG Xiao-nan, et al. Comparative experiment on influence of ferrum and cuprum electrodes on electroosmotic effects[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, 35(2): 388-394.
- [13] 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(增刊 1): 152-155.
- ZHUANG Yan-feng. Theory and design method for electro-osmotic consolidation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(S1): 152-155.
- [14] HU L. Recent research and applications in the use of electro-kinetic geosynthetics[C]//International Geosynthetics Society. Scotland, 2008.
- [15] 符洪涛, 王军, 蔡袁强, 等. 低能量强夯-电渗法联合加固软黏土地基试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(3): 612-620.
- FU Hong-tao, WANG Jun, CAI Yuan-qiang, et al. Experimental study of combined application of electro-osmosis and low-energy dynamic compaction in soft ground reinforcement[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(3): 612-620.
- [16] 孙召花, 余湘娟, 高明军, 等. 真空-电渗联合加固技术的固结试验研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(2): 250-258.
- SUN Zhao-hua, YU Xiang-juan, GAO Ming-jun, et al. Experimental studies on vacuum preloading incorporated with electro-osmosis consolidation for dredger fill[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(2): 250-258.
- [17] VAN IMPE W F. Soil Improvement Techniques and Their Evolution[M]. Rotterdam, the Netherlands: 1989.
- [18] MURUGESAN S, RAJAGOPAL K. Studies on the behavior of single and group of geosynthetic encased stone columns[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2010, 136(1): 129-139.
- [19] 赵明华, 顾美湘, 张玲, 等. 竖向土工加筋体对碎石桩承载变形影响的模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(9): 1587-1593.
- ZHAO Ming-hua, GU Mei-xiang, ZHANG Ling, et al. Model tests on influence of vertical geosynthetic-encasement on performance of stone columns[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(9): 1587-1593.
- [20] 欧阳芳, 张建经, 付晓, 等. 包裹碎石桩承载特性试验研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(7): 1929-1936.
- OUYANG Fang, ZHANG Jian-jing, FU Xiao, et al. Experimental analysis of bearing behavior of geosynthetic encased stone columns[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(7): 1929-1936.
- [21] 谈庆明. 量纲分析[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2005.
- TAN Qing-ming. Dimensional Analysis[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2005.
- [22] 杨俊杰. 相似理论与结构模型试验[M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2005.
- YANG Jun-jie. Similarity Theory and Structural Model Experiments[M]. Wuhan: Wuhan University of Technology Press, 2005.
- [23] 刘广明, 杨劲松. 土壤含盐量与土壤电导率及水分含量关系的试验研究[J]. 土壤通报, 2001, 32(增刊 1): 85-87.
- LIU Guang-ming, YANG Jin-song. Study on the correlation of soil salt content with electric conductivity and soil water content[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2001, 32(S1): 85-87.
- [24] ARAUJO G. Behaviour of geosynthetic-encased granular columns in porous collapsible soil[J]. Geosynthetics International, 2009, 16(6): 433-451.
- [25] 徐志闻, 刘亚斌, 胡夏嵩, 等. 基于水分和原位电导率的西宁盆地盐渍土含盐量估算模型[J]. 农业工程学报, 2019, 35(5): 148-154.
- XU Zhi-wen, LIU Ya-bin, HU Xia-song, et al. Salt content estimation model of saline soil in Xining Basin based on water content and electrical conductivity[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(5): 148-154.
- [26] 刘国华, 王振宇, 黄建平. 土的电导率特性及其工程应用研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(1): 83-87.
- LIU Guo-hua, WANG Zhen-yu, HUANG Jian-ping. Research on electrical resistivity feature of soil and its application[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(1): 83-87.
- [27] 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 Xiao-nan, 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(S2): 4027-4032.
- [28] 庄艳峰, 王钊. 电渗的电荷累积理论[J]. 岩土力学, 2005, 26(4): 629-632.
- ZHUANG Yan-feng, WANG Zhao. Electric charge accumulation theory for electro-osmotic consolidation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(4): 629-632.