

DOI: 10.11779/CJGE2015S1014

电渗处理软基的电极转换规律试验研究

沈 扬^{1, 2}, 徐海东^{1, 2}, 尤延锋^{1, 2}

(1. 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; 2. 河海大学岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210098)

摘要: 电渗处理软基过程中, 为探寻电极转换周期规律, 运用耐腐蚀的新型 EKG 电渗排水板分别进行了等时间周期、等排水量的电极转换试验。前者以单元土体为模型, 通过观测电流、排水量随电极转换产生的变化以及数据分析, 证明了等时间周期的电极转换不利于电渗排水; 而后一组平行试验是以长方形土体为一维模型, 控制等排水量以进行电极转换, 记录电极转换时间以及周期并将数据进行数值拟合, 揭示出一种呈指数函数的拟合曲线, 并且运用铁作为电极材料也能得到理想的电极转换周期规律和相近的排水效果, 但铁耐腐蚀性能较差, 不可长期使用。最后将电极转换与常规电渗试验所得土体含水率和电导率分布示意图进行对比, 证实了 EKG 电渗排水板进行等排水量的电极转换试验能获得处理均匀的土体, 为 EKG 材料代替铁在电渗领域的运用提供可靠的试验依据。

关键词: 电渗; 电极转换周期规律; 新型 EKG 电渗排水板

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2015)S1-0065-07

作者简介: 沈 扬(1980-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为土的基本工程特性、地基处理。E-mail: shenyang1998@163.com。

Cyclic electrode conversion law in treatment of soft soil foundation

SHEN Yang^{1, 2}, XU Hai-dong^{1, 2}, YOU Yan-feng^{1, 2}

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In treatment of soft soil foundation by electro-osmotic drainage, to explore the electrode conversion cycle, the equal-time and equal-drainage-volume electrode conversion tests are performed by using a new kind of corrosion-resisting EKG drainage board. In the former test, unit soil is given as the model, change of currents and displacement is observed, and equal-time electrode conversion is proved to be not conducive. Rectangular shaped soil is regarded as an one-dimensional model and equal drainage volume is controlled by switching electrode in another parallel test, where electrode conversion time and cycle are recorded for numerical fitting, and an exponential curve fitting is revealed. In the same way, ideal electrode conversion cycle law and analogous drainage volume can be easily got by iron, but the iron cannot afford long-time electro-osmosis because of corrosion. Finally, by measuring the soil moisture content and electric conductivity after electrode conversion and conventional electro-osmosis tests, distribution diagrams of soil moisture content and electric conductivity are compared. It's found that the equal-drainage-volume electrode conversion test by EKG drainage board can obtain processed homogeneous soil, which can provide reliable experimental basis for the application of EKG drainage board instead of iron in the electric field.

Key words: electro-osmosis; electrode conversion cycle; new EKG drainage board

0 引言

电渗法是一种化学、物理、力学共同作用^[1]的吹填土处理方法, 近年来逐渐受到科研人员的关注。但金属电极易腐蚀、处理后土体强度不均、电渗后期能耗大^[2]等问题, 限制了电渗的发展。

电极腐蚀是由于金属离子参与到电化学过程中, 发生氧化反应; 处理后土体强度不均主要是因为水在电渗驱动下向阴极运动, 使阳极附近土体固结速率大

于阴极附近土体; 而电渗后期能耗大是由于不仅受到电极腐蚀的影响, 还因为在连续直流电场作用下阴阳极间存在的酸碱、水力、电势等梯度干扰了土体内部离子运动^[3]。

耐腐蚀电极是进行有效电渗处理软基的基本保

基金项目: 长江学者和创新团队发展计划资助项目(IRT1125); 中央科研业务费重点培育项目(2014B04914)

收稿日期: 2015-03-26

证。国内外已取得一定成果, Fourie 等研制出新型土工合成材料并成功运用于矿山尾矿排水^[4], 庄艳峰等也研制出一种可导电的塑料排水板^[5]。本文运用了一种新型导电耐腐蚀 EKG 电渗排水板进行试验研究, 为 EKG 材料代替铁在电渗领域的运用提供可靠的试验依据。

电极转换可缓解电渗后期能耗大、处理土体后强度不均的问题^[6]。转换电极后, 阴阳极之间的酸碱、水力等梯度将减弱, 土体内部电荷重新分布, 水中的离子被激活, 携带着自由水向阴极流动。国内外学者针对电极转换研究多以探究其对电渗排水速率的影响、证明电极转换处理土体后阴阳极间土体强度更为均匀^[7-8]为主要目的, 未对电极转换操作周期给予较为详细的建议。根据笔者前期的试验研究发现, 电极转换周期过长, 阴阳极之间存在的酸碱、水力、电势等梯度十分明显; 周期过短, 则积聚在阴极的水头远远不够形成水势而排出。故电极转换时间周期是决定电渗处理效果的重要因素。

针对时间周期难以确定的问题, 笔者运用自主研发的试验装置, 先以时间为控制电极转换的参考对象, 进行了等时间周期的电极转换试验, 之后运用自主研制的试验系统又进行了以保持两极排水量相等作为控制电极转换参考对象的试验。试验发现, 保持两极排水量相等控制电极转换得到电渗后的土体强度均匀, 且测得的试验数据便于得出可靠的电极转换周期曲线。

1 试验方案

1.1 试验目的

为验证等时间周期的电极转换是否有利于电渗排水, 运用单元土体电极转换试验装置进行等时间周期的电渗试验, 分析电极转换过程中电流变化曲线, 总结以等时间为电极转换周期的优点及缺陷。

为优化电极转换以获得处理均匀的土体, 并获得理想的电极转换周期规律, 运用土体一维电极转换试验系统进行控制两极排水量相等的电极转换试验。

1.2 试验模型

本文所述的两种试验分别应用了两种试验模型, 其中等时间周期的电极转换试验采用的是单元土体电极转换试验装置, 而等排水量的电极转换试验采用的是土体一维电极转换试验系统。

(1) 单元土体电极转换试验装置

单元土体电极转换试验装置主要用于进行等时间周期电极转换试验来观测几组不同电极转换时间周期对土体内部电流、排水情况等的影响, 并为选择合适

的电极转换时间周期提供理论依据。

前人在研究电极转换时多采用现场试验或室内大体积试验^[8-9], 土体中多种因素对研究电极转换影响较大, 如土体裂缝、界面电阻、土体不均匀等。本装置对试样尺寸参数进行优化, 采用小体积模型, 可削弱时间上的滞后性, 使试验中进行的电压变化、极性方向转变等引起的排水效果、电流变化能迅速显现, 便于研究电压变化、极性方向转变等对电渗的影响, 为现场试验中选择电压、时间周期等方面的参数提供理论参考, 并可结合现场试验中所得的排水量等结果对室内试验的理论进行修正, 建立一种以等时间为周期的电极转换规律。

试验装置如图 1 所示。其主要由电极自动转换控制器(1)、直流电源(6)、计算机系统(7)、试验模型盒(8)构成, 电极自动转换控制器与显示面板(2)、控制面板(3)、4 个电流输入/输出端口(4)、电极转换装置—计算机连接端口(5)集于一体, 其中电极转换控制器的主要元件是 PLC; 模型盒置于支架上, 内部两个电渗排水板夹住尺寸为 3 cm×10 cm×10 cm 的土样, 图中的模型盒排水口呈朝下状态; 直流电源为电渗输送电流。

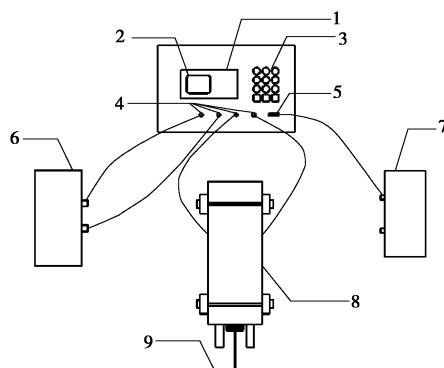


图 1 单元土体电极转换试验装置整体图

Fig. 1 Diagram of test device

图 2 的模型盒拆分后细部图包括模型盒体(1)、模型盖(4)、排水口(2)、引水槽(3)、引线洞(5)、密封垫(6)、夹板(7)、螺栓(8)等。两引水槽设于盒体内壁, 与排水口相连, 两槽间距 3 cm, 即为土样厚度, 引水槽表面覆盖土工布, 防止土漏出; 导线从引线洞引出, 并用橡皮塞、密封胶密封洞口; 密封垫黏贴于盒盖内侧, 盒盖扣在盒体上; 装好试样并扣上盒盖后, 用夹板夹住模型盒, 拧紧螺栓, 确保盒盖与盒体紧密无缝; 整个模型盒置于支架之上, 上部排水试验时排水口朝上, 下部排水试验时排水口朝下。

(2) 土体一维电极转换试验系统

土体一维电极转换试验系统采用的模型盒如图 3

所示, 包括导线(1)、EKG 电渗排水板(2)、土工滤布(3)、试验模型盒体(4)、排水容器(5)。EKG 电渗排水板被编号为 1 号电极和 2 号电极, 下部处理成细条状, 便于计数排出的水滴; 铁电极试验时进行类似处理。本试验模型盒采用下部排水, 代替了单元土体电极转换试验装置的模型盒, 并增加了手动控制电极转换功能。试验系统的其余部分大致与单元土体电极转换试验装置相同。

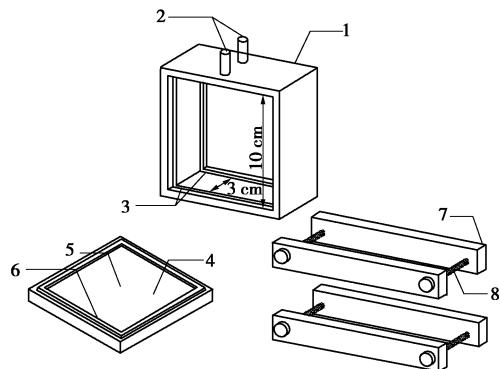


图 2 试验模型盒拆分后细部图

Fig. 2 Detail of model box

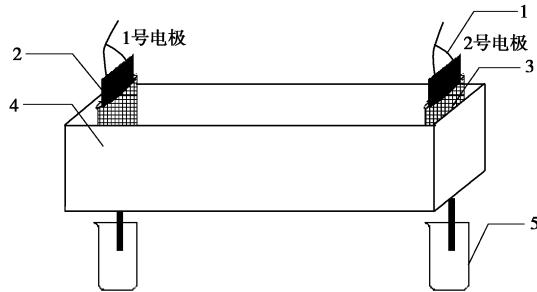


图 3 土体一维电极转换试验模型盒图

Fig. 3 Model box of test system

模型盒由尺寸为 $27\text{ cm} \times 9\text{ cm} \times 6\text{ cm}$ 的有机玻璃加工而成, 于底部开两个相距 25 cm 的洞口, 用于插入电极。同时需在电极外侧包裹一层土工布, 以防土随水从下口流出。为减小边界对土体沉降产生的干扰, 在模型盒四周及底部覆上一层保鲜膜, 起到润滑作用, 若涂抹凡士林, 将造成土体内部离子环境变化, 不建议使用。

电极转换周期规律的研究得出成果后, 该装置中的相关功能(如自动电极转换)、试验得到的理论规律(如电极转换规律)等, 均可应用于实际工地, 提高施工效率、质量, 并达到节约人力、时间、能耗的目的。

1.3 电极材料和试验土样

在本论文的两类试验中, 均采用了耐腐蚀导电塑料 EKG 电渗排水板, 图 4 所示是本试验所用的江阴

华宏集团生产的 EKG 电渗排水板, 目前尚在改进阶段。



图 4 EKG 电渗排水板

Fig. 4 EKG drainage board

为比较 EKG 电渗排水板和铁电极, 等排水量电极转换试验中采用空心铁棒作电极材料进行了试验。

试验土样取自南京河西地区, 土体基本物理性质指标如表 1 所示, 为典型的南京地区粉质黏土。原状土初始含水率较低, 需晒干后粉碎, 测量干土平均含水率约为 3% 后, 加适量水, 搅拌、静置, 配置成含水率为 50%, 电导率为 $0.58\text{ }\mu\text{s}$ 的饱和重塑软黏土用于电渗试验。

表 1 河西土基本物理性质指标

Table 1 Basic physical properties of Hexi soil of Nanjing

G_s	$k /(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$	$w_L/\%$	$w_p/\%$	I_p
2.71	1.19×10^{-6}	41.5	31.3	10.2

由于土样持水性较好, 在 50% 含水率且无附加应力作用时, 土样中的重力水无法自由排出, 故试验排出的水均可视为电渗作用排水。若采用大于 55% 含水率的土样进行试验, 重力排水将对试验分析产生干扰。

1.4 试验内容

(1) 等时间周期电极转换试验

前人在选择电极转换周期多是依据经验, 如王协群等采用 $45\text{ cm} \times 45\text{ cm} \times 60\text{ cm}$ 的模型, 并设定电极转换周期为 12 h ^[8]。笔者在开展试验之前进行了试探试验, 从非电极转换试验中发现, 由于本试验模型较小, 2 h 电渗后期几乎无水排出, 故尝试了以 5, 10, 15, 20, 30, 60 min 为周期的电极转换试验。总结发现长周期不利于本试验土体电渗排水; 时间过短, 则初始几次电极转换过程中有水排出而后期无水排出, 每 10 min 至 30 min 进行一次电极转换可使排水进行较长时间, 且不显著影响排水速率。本文便开展 25 V 电压下 15 min 等时间周期电极转换试验, 并以之为例在后文进行了分析。

(2) 等排水量电极转换试验

试验发现, 等时间周期的电极转换不利于持续电

渗排水, 故改变控制对象, 由控制时间相等变为以控制两极排水量相等, 进行等排水量的电极转换试验。

笔者利用自主研制的土体一维电极转换试验系统进行以铁、EKG 电渗排水板为电极材料的等排水量电极转换试验。根据模型体积以及等时间周期电极转换试验经验, 选取阴极滴落 5 滴水作为电极转换的标准较为合适。若选取滴数过大, 就如等时间周期试验中选择了过长的时间周期, 不利于排水的持续性; 而滴数过少, 则土中水体进行频率较大的往复运动, 难以排水。

具体方案是: 记第一次电极转换周期内 1 号电极排 5 滴水需时 T_1 , 2 号电极排 5 滴水需时 T_2 , 如此反复转换电极, 对得到的一系列 T_1 , T_2 进行分析, 探寻每一极排水 5 滴的周期规律。

2 等时间周期电极转换试验结果与分析

图 5 为整个电极转换过程中电流曲线。

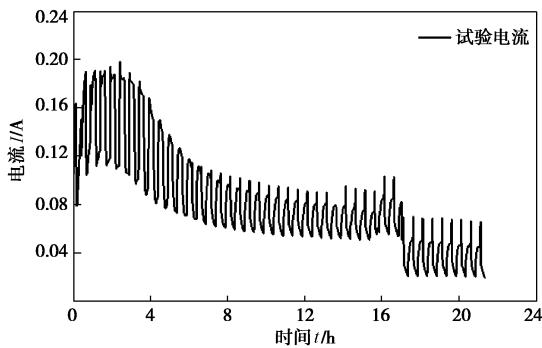


图 5 电极转换过程中总电流曲线 (EKG)

Fig. 5 Curves total current of electrode conversion (EKG)

能耗是分析的重点, 能耗系数 $C^{[9]}$ 如下式所示

$$C = \frac{E}{Q_{t_1-t_2} V}, \quad (1)$$

$$E = \int_{t_1}^{t_2} I U dt. \quad (2)$$

式中 E 为 t_1 至 t_2 时刻电渗能耗; $Q_{t_1-t_2}$ 为 t_1 至 t_2 时刻的排水量; V 为土样体积; U 和 I 分别表示电源的输出电压和在 t 时刻土体中的电流; t_1 趋近 t_2 时, C 表示电渗中任意时刻从单位体积土排出单位体积水所消耗的能量。

以 0~4 h 阶段电流曲线为例, 如图 6 所示, 分析这段时间的电流及能耗。

土体两侧分别为 1, 2 号电极, 0~4 h 阶段内, 1 号为阳极时排水 120.0 mL, 2 号为阳极时排水 30.0 mL, 根据式 (2), 某一时段内电渗能耗即为此时段内电流曲线与坐标轴包围区域的面积 (图中浅灰色区域面积即 P_1 阶段对应的 1 号电极为阳极时的能耗, 深灰色区域即 P_2 阶段对应的 2 号电极为阳极时的能耗)。

积分可得

$$E_1 : E_2 = 1.6. \quad (3)$$

根据 1, 2 号电极分别作为阳极时的排水量可得

$$Q_1 : Q_2 = 4.0. \quad (4)$$

根据式 (1), 体积 V 变化可忽略, 推得

$$C_1 : C_2 = 0.4. \quad (5)$$

可见 P_1 阶段单位体积排水能耗仅为 P_2 的 40%, 故电极转换降低了电渗能耗系数, 实际表现为节约电能。

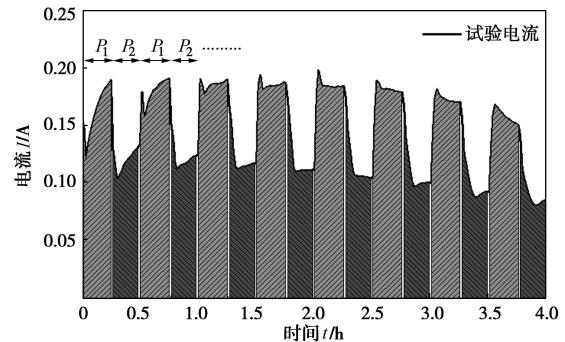


图 6 0~4 h 阶段电流曲线图 (EKG)

Fig. 6 Electric current of 0~4 h (EKG)

7~15 h 阶段, 随着不断排水, 含水率降低, 土体逐渐固结, 能在短时间内排出土体的水分越来越少。因为此时电极转换频率相对过快, 水分在下一次电极转换之前无法穿过固结区域排出, 此后电极转换就失去意义。

在 17 h 附近尽管将电压升至 30 V, 但电流经过一段时间陡增之后陡降, 电流最小值从 0.05 A 降至 0.025 A 左右, 仍未促进排水。故在排水减少时升高电压不会促进排水, 反而造成电流的降低。电渗流是由于土表面带负电荷, 土体内部毛细管表面的负电荷与毛细管溶液中积聚相反电荷的对离子形成双电层, 处于扩散层中的阳离子形成一个圆筒形阳离子鞘, 在电场作用下阳离子鞘相对毛细管内壁运动, 引起整个流体向阴极移动^[10]。经过持续直流电场作用, 土体两极的离子浓度过大, 阳离子群与两极附近离子发生摩擦、碰撞几率增大, 迁移受阻碍; 增大电压后, 两极的离子积聚更快, 与阳离子群摩擦、碰撞几率陡然增加, 因而宏观上表现为电流陡降。

为验证上述增大电压反而引起电流下降这一现象普遍存在, 笔者进行了以 10, 20, 30 min 为等时间周期的电极转换试验, 得到类似效果。在此不作赘述。

从该试验中笔者得出: 电渗初期进行电极转换可降低电能, 而电渗排水不畅阶段应适当调整电极转换周期, 电渗难以排水是由于电极转换产生的反向渗流导致来不及有效排水, 此阶段电极转换不仅毫无作用

还会造成能耗的浪费。在此期间升高电压反而会造成电流的下降, 却无水排出, 因此不建议在后期采取升高电压的措施。

3 等排水量电极转换试验结果与分析

3.1 试验拟合曲线

以铁为电极材料的等排水量电极转换试验中, 1, 2 号电极(图 4 中已标记)分别为阳极时一次电极转换所需时间随电极转换周期变化的曲线如图 7 所示, 所谓“一次电极转换所需时间”即“从电极切换的时刻开始到阴极排出预定水量的时刻”为止这个过程所经历的时间。

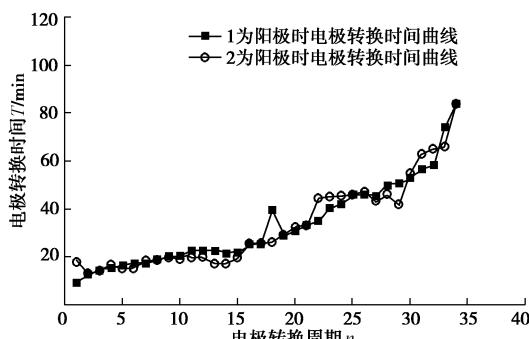


图 7 电极转换所需时间随电极转换周期变化的曲线(铁)

Fig. 7 Curves of electrode conversion time (Iron)

根据所绘点得出如下拟合函数

$$T_1 = 11.6e^{0.053n}, \quad (6)$$

$$T_2 = 11.5e^{0.053n}, \quad (7)$$

式中, n 表示电极转换次数, T 表示对应电极转换次数所需的电渗时间。

曲线拟合效果用相关系数 R^2 表示。1, 2 号电极作为阳极时相关系数值分别是 0.96 和 0.92, 可见相关系数均较高, 且两条拟合曲线的系数、次数均很接近。可预测无其它因素影响时, 之后每个电极作阳极时经历一次电极转换所需时间 T 将依从拟合的函数曲线发展。

以 EKG 电渗排水板为电极材料的等排水量电极转换试验中, 1, 2 号电极分别作为阳极时一次电极转换所需时间随电极转换周期变化的曲线如图 8 所示。

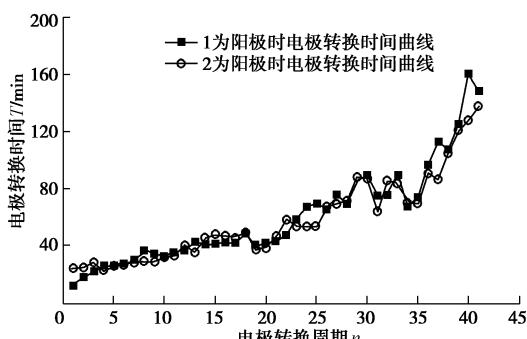


图 8 电极转换所需时间随电极转换周期变化的曲线(EKG)

Fig. 8 Curves of electrode conversion time (EKG)

根据所绘点得出如下拟合函数

$$T_1 = 10.3e^{0.050n}, \quad (8)$$

$$T_2 = 12.3e^{0.049n}. \quad (9)$$

1, 2 号电极为阳极时相关系数分别是 0.88 和 0.90, 数值也较高, 且两条拟合曲线的系数、次数均较为接近, 可以推断电极转换的一个周期内 1 号电极和 2 号电极分别作为阳极时排 5 滴水所需时间 T 相对均衡。

对比式(6)、(7)和式(8)、(9)可看出各系数值大小相近, 拟合效果相似。从最终排水来看, 两种材料分别进行试验的总排水量也十分接近。但由于铁性质的原因, 为期 3 d 的试验导致铁棒表面锈蚀严重, EKG 电渗排水板无明显变化。因而, 在同样电渗效果的前提下, 在抗腐蚀方面 EKG 电渗排水板具有更大优势, 可以在工期更长的工程中持续利用, 甚至达到重复利用的目的。

不论是 EKG 还是铁, 电极转换所需时间随电极转换周期变化的曲线都呈现递增趋势。这是在牺牲部分时间的前提下换取了土体内部含水率及强度的均匀性。

3.2 含水率

以 EKG 电渗排水板、铁为电极材料的等排水量的电极转换试验结束后进行了含水率的量测, 土体内部含水率 w 位置分布示意图如图 9 所示。

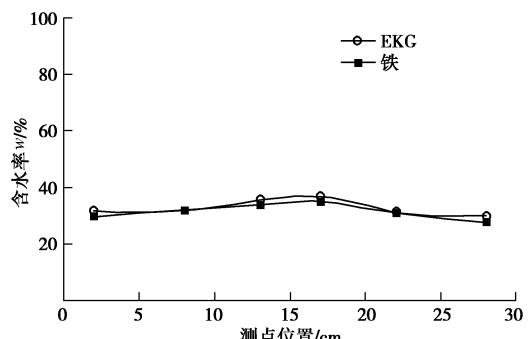


图 9 土体内部含水率位置分布示意图(电极转换, EKG 和铁)

Fig. 9 Distribution of soil moisture (Electrode conversion, EKG & Iron)

本文采用标准差变异系数来表示各点含水率、电导率的差异程度。结果显示 EKG 电渗排水板和铁作为电极材料时的变异系数分别为 0.065, 0.061, 两者相近。

从图 9 中可见, 越靠近电极土体含水率越低, 且两电极附近含水率十分接近, 已达到克服电渗处理软土出现强度不均的目的。但试样中部测点的含水率高于两侧的土体含水率, 故采用电极转换可能导致中部土体含水率偏高, 需继续进行电极转换排水来解决。

为验证电极转换利于电渗处理土体后效果的均匀性, 还以相同时间内进行的非电极转换试验为参照, EKG 电渗排水板、铁为电极材料的非电极转换试验结束后土体内部含水率 w 位置分布示意图如图 10 所示。

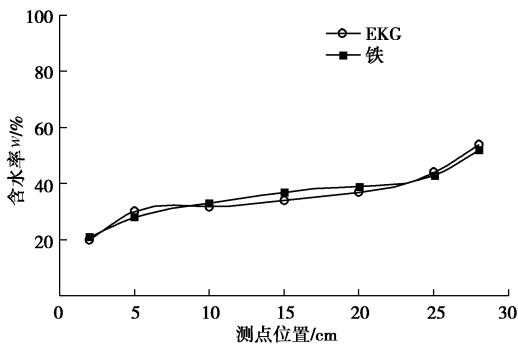


图 10 土体内部含水率位置分布示意图 (非电极转换, EKG 和铁)

Fig. 10 Distribution of soil moisture (Without electrode conversion, EKG & Iron)

根据各点含水率计算得到 EKG 电渗排水板和铁作为电极材料时得到的变异系数分别为 0.25, 0.22, 两者相近。从电极转换与非电极转换试验所得含水率分布的变异系数对比中可知, 经过电极转换处理得到的土体均匀性远优于未经电极转换处理得到的土体, 且含水率的均匀性直接影响到土体强度的均匀性, 处理得当将极大降低不均匀沉降发生的几率。

3.3 电导率

以 EKG 电渗排水板、铁为电极材料的电极转换试验结束后进行了电导率的量测, 土体内部电导率 k 位置分布示意图如图 11 所示。

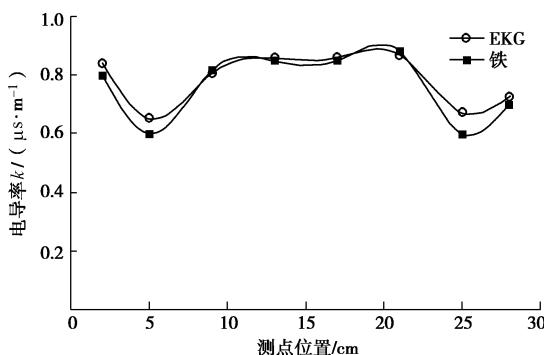


图 11 土体内部电导率位置分布示意图 (电极转换, EKG 和铁)

Fig 11 Sketch map of soil conductivity distribution (Electrode conversion, EKG&Iron)

各点量测的电导率计算得到 EKG 电渗排水板和铁作为电极材料时得到的变异系数分别为 0.11, 0.14, 两者相近。从图 11 中数据分布可以看出, 靠近电极的土体电导率较低, 1 号电极外侧电导率高于 2 号电极外侧, 可见电导率与含水率分布关联不大, 所以导致

土体这种电导率分布的主要原因不在于含水率, 而是由离子迁移、集散引起的。

对于非电极转换试验, 将得到的土体内部电导率进行了对比。土体内部电导率 k 位置分布示意图如图 12 所示。

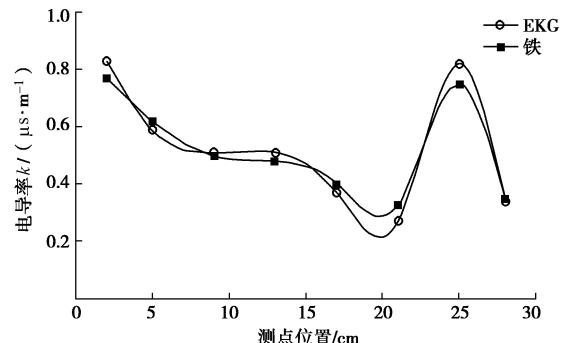


图 12 土体内部电导率位置分布示意图 (非电极转换, EKG 和铁)

Fig. 12 Distribution soil conductivity (Without electrode conversion, EKG & Iron)

各点量测的电导率计算得到 EKG 电渗排水板和铁作为电极材料时得到的变异系数分别为 0.37, 0.35, 两者相近。从电导率分布的变异系数对比中可知, 经过电渗电极转换处理得到的土体内部离子分布的均匀性优于未经电极转换处理得到的土体。虽然电导率的均匀性不能直接影响到土体强度的均匀性, 但是均匀的电导率将保证土体电阻均匀, 而非均匀电导率的土体电阻将在电导率出现极小值处产生最大电阻, 影响土体内部离子运动。

通过对比可以发现, 用 EKG 电渗排水板或铁作为电极材料进行等排水量的电渗电极转换处理后, 不管是从直接影响土体处理的均匀性还是间接的影响电渗顺利进行, 效果都优于非电极转换。

4 结 论

本文运用自主研制的单元土体电极转换试验装置和土体一维电极转换试验系统分别进行了等时间周期的电极转换试验和等排水量的电极转换试验, 得到如下结论:

(1) 在电渗初期进行电极转换, 电渗能耗系数 C 得到降低, 但在排水不畅时等时间周期的电极转换效果较差, 依据经验应适当延长周期, 且不建议增大电压来促进电渗排水。

(2) 铁和 EKG 电渗排水板均适用于等排水量的电极转换, 可获得具有指数变化形式的电极转换规律。但 EKG 电渗排水板更适用于长期的电渗工程, 且不会对土质造成影响, 环保耐用。

(3) 电渗工程中采用等排水量的电极转换方式可以达到均匀处理吹填土的目的, 均匀性远远优于常规直流电渗处理得到的土体。并可以自动控制电极转换, 节约人力、时间, 降低工程成本。

参考文献:

- [1] ESTABRAGH A R, NASEH M, JAVADI A A. Improvement of clay soil by electro-osmosis technique[J]. Applied Clay Science, 2014, **95**: 32 – 36.
- [2] KALUMBA D, GLENDINNING S S, ROGERS C D F, et al. Dewatering of tunneling slurry waste using electrokinetic geosynthetics[J]. Journal of Environmental Engineering, ASCE, 2009, **135**(11): 1227 – 1236.
- [3] 李瑛. 吹填土地基电渗固结试验和理论研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2011. (LI Ying. Experimental and theoretic study on electro-osmotic consolidation of soft clay foundation[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011. (in Chinese))
- [4] FOURIE A B, JOHNS D G, JONES C J F P. Dewatering of mine tailings using electrokinetic geosynthetics[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2007, **44**(2): 160 – 172.
- [5] 胡俞晨, 王钊, 庄艳峰. 电动土工合成材料加固软土地基试验研究[J]. 岩土工程学报, 2005, **27**(5): 582 – 586. (HU Yu-chen, WANG Zhao, ZHUANG Yan-feng. Experimental studies of electro-osmotic consolidation of soft clay using EKG electrodes[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, **27**(5): 582 – 586. (in Chinese))
- [6] WAN T V, MITCHELL J K. Electro-osmotic consolidation of soils[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 1976, **102**(5): 473 – 491.
- [7] LO K Y, INCULET II, HO K S. Electro-osmotic strengthening of soft sensitive clays[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1991, **28**(1): 62 – 73.
- [8] 王协群, 邹维列. 电渗排水法加固湖相吹填土的试验研究 [J]. 武汉理工大学学报, 2007, **29**(2): 95 – 99. (WANG Xie-qun, ZOU Wei-lie. Experimental research on electro-osmotic consolidation of lacustrine clay[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2007, **29**(2): 95 – 99. (in Chinese))
- [9] 李一雯. 电极布置形式对电渗效果的试验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013. (LI Yi-wen. Experimental research on the effect of electrodes array to electro-osmotic dewatering[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011. (in Chinese))
- [10] LOO J A, JONES H K, UDSETH H R, et al. Capillary zone electrophoresis-mass spectrometry with electrospray ionization of peptides and proteins[J]. Journal of Microcolumn Separations, 1989, **1**(5): 223 – 229.

(本文责编 黄贤沙)