

# 低能量强夯 - 电渗法联合加固软黏土地基试验研究

符洪涛<sup>1,2</sup>, 王 军<sup>1,2</sup>, 蔡袁强<sup>1,2</sup>, 张 乐<sup>3</sup>, 蔡 瑛<sup>1</sup>

(1. 温州大学 建筑与土木工程学院, 浙江 温州 325035; 2. 温州大学 浙江省软弱土地基与海涂围垦工程技术重点实验室, 浙江 温州 325035;  
3. 上海松江新城建设发展公司, 上海 201620)

**摘要:** 针对电渗过程中土样开裂造成电阻增大, 阳极腐蚀造成界面电阻增大, 能量消耗增大且加固效果减弱, 极端情况下甚至造成电渗过程中断的问题, 以及考虑到强夯法对开裂土体进行处理, 不仅使开裂土体重新弥合, 更可弥补电渗法的土骨架加密部分的功能缺失。因此, 通过低能量强夯联合电渗法室内模型试验与单独电渗试验进行对比分析, 分别获得 2 种试验条件下电路电流、土体出流、土体含水率、土体电导率、pH 值等变化规律。研究表明: 低能量强夯时改善了土体排水路径, 使得土体出流表现强于单纯电渗的情况; 低能量强夯能够增强电路电流、增强土体密实性以弥补土体裂纹的同时, 促进土表沉降发展、改善环向土体处理的不均匀问题和减缓阳极腐蚀发展。在实际工程中, 为提高加固效果, 低能量强夯重点施加于阳极区土体开裂处, 而不对阴极区土体进行强夯; 在土体出流量突然变小且阳极区土体干燥时, 选取阳极区土体干燥处作为夯点并开始强夯, 待所有区域点夯完后, 再针对阳极区土体进行低能量满夯, 不对阴极区土体进行满夯处理。

**关键词:** 土力学; 低能量强夯; 电渗法; 密实; 沉降; 排水路径

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2015)03 - 0612 - 09

## EXPERIMENTAL STUDY OF COMBINED APPLICATION OF ELECTRO-OSMOSIS AND LOW-ENERGY DYNAMIC COMPACTION IN SOFT GROUND REINFORCEMENT

FU Hongtao<sup>1,2</sup>, WANG Jun<sup>1,2</sup>, CAI Yuanqiang<sup>1,2</sup>, ZHANG Le<sup>3</sup>, CAI Ying<sup>1</sup>

(1. *College of Architecture and Civil Engineering, Wenzhou University, Wenzhou, Zhejiang 325035, China*; 2. *Key Laboratory of Engineering and Technology for Soft Soil Foundation and Tideland Reclamation, Zhejiang Province, Wenzhou University, Wenzhou, Zhejiang 325035, China*; 3. *Shanghai Songjiang New City Construction Development Company, Shanghai 201620, China*)

**Abstract:** The dynamic compaction with low energy was considered to deal with the problems of the increasing of the electrical resistance of soil samples due to cracking and of the interface between anode and soil, the increasing of energy consumption and the decreasing of the effect of consolidation due to anode corrosion in the electro-osmotic process, and in the extreme cases the interruption of the electro-osmotic process. Indoor model tests of electro-osmosis with and without the low-energy dynamic compaction were carried out respectively. The low energy dynamic compaction was found to improve the drainage paths of the soil and the water drainage was increased than that without dynamic compaction. The electrical circuit current was increased and soil compactness was enhanced due to low-energy dynamic compaction. The cracks in soils ample was closed, the surface settlement

收稿日期: 2014 - 02 - 13; 修回日期: 2014 - 03 - 17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51278383, 51408440); 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2011CB411907)

作者简介: 符洪涛(1987 - ), 男, 硕士, 2010年毕业于江西理工大学土木工程专业, 现任实验员, 主要从事地基处理方面的研究工作。E-mail: fuhongtao2012@163.com

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2015.03.019

was increased, and the uneven settlement of soil and the anode corrosion were reduced due to the low-energy dynamic compaction. Suggestions of carrying on dynamic compaction in the cracking soil of anode zone were thus made for application in the engineering practice. Dynamic compaction should start when the water flow become smaller and the anode zone become dry.

**Key words:** soil mechanics; low-energy dynamic compaction; electro-osmosis; compactness; settlement; drainage path

## 1 引 言

电渗法加固软弱地基作为一种新的处理手段,因其自身的处理优点,各国学者对其开展了大量的研究工作,工程中也有了成功的应用。电渗法具有加固速度快,对细颗粒、低渗透性土有良好的加固效果等优点<sup>[1]</sup>。M. I. Esrig<sup>[2]</sup>于 1968 年最早进行了电渗固结理论的研究,并提出了电渗的一维固结经典理论; J. Q. Su 和 Z. Wang<sup>[3]</sup>在 Esrig 一维固结理论的基础上采用分块处理的方法进行了二维固结理论的解析,提出了电渗的二维固结理论; Y. F. Zhuang 和 Z. Wang<sup>[4]</sup>对电渗过程中的界面电阻问题进行了分析; S. Glendinning<sup>[5-6]</sup>对 EKG 开展了研究,并对其使用范围进行了推广,取得了较好的效果; S. Micic 等<sup>[7]</sup>研究了间歇通电技术在电渗处理海洋土的应用效果,指出该技术可以减少电渗过程中阳极腐蚀和电能消耗; 李 瑛等<sup>[8]</sup>采用模型筒对电极圆形同轴布置进行了室内试验,报道了电渗固结加固软黏土的二维性状。

固结包括渗流和土骨架变形两部分内容<sup>[9]</sup>。电渗法的土骨架加密部分的功能缺失为电渗法与预压加固、强夯等可以使土骨架加密的方法进行联合应用留下了契合点。也可以利用真空预压或者堆载预压先行对土样进行加固,将易于排出的水排出,再利用电渗法可以排出弱结合水的优势继续降低含水量,提高土体强度。

郑颖人等<sup>[10]</sup>对强夯加固软土地基的机制进行了分析,并提出了加固软黏土先轻后重、逐级加能,轻重适度、少击多遍的新工艺; 赵建国和朱文凯<sup>[11]</sup>以珠海市红旗变电站场地软土加固处理工程为例,阐述了电渗 - 强夯综合法对软土的加固机制; 刘凤松和刘耘东<sup>[12]</sup>对国内首例利用真空预压、电渗降水、低能量强夯多种处理方法进行大面积软弱地基加固处理的施工方案、工艺流程与加固效果监测进行了详细介绍与应用分析; 廖敬堂和廖宏志<sup>[13]</sup>报道了真空电渗与低能量强夯联合加固法在实际工程中

的应用实例; 高有斌等<sup>[14]</sup>报道了电渗法与强夯法联合作用的应用实例; F. Burnotte 等<sup>[15]</sup>在现场试验中采用的电极布置间距为 3 m,能够反映工程实用时的情况。则作业空间能够满足后续强夯设备的操作需求,电渗 - 强夯联合具有可操作性。

电渗法加固土样过程中会使土样开裂造成电阻增大,阳极腐蚀造成界面电阻增大,能量消耗增大且加固效果减弱,极端情况下甚至造成电渗过程中断。此时,若利用强夯法对开裂土体进行处理,使开裂土体重新弥合,再进行电渗加固将是值得研究的工艺。针对上述问题,本文通过电渗、强夯 - 电渗联合 2 组对比试验对低能量强夯与轴对称电渗联合作用机制进行研究,以期对工程应用有所裨益。

## 2 试验介绍

### 2.1 土样制备

试验土样取自温州龙湾吹填现场。试验前,将土样烘干、粉碎并加水搅拌,制成目标含水率 64% 的重塑土样,密闭静置 24 h 以保证土样均匀。土样制备过程中,对试验土体基本物理参数进行测试,相关参数如表 1 所示。

表 1 软黏土基本物理参数

Table 1 Basic physical parameters of the soft clay

含水率 w/%	相对密 度 $G_s$	重度 $\gamma /$ ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	孔隙 比 $e$	饱和度 $S_r/\%$	塑限 $W_p/\%$	液限 $W_l/\%$	电导 率/ms	pH 值
64	2.74	16.7	1.53	99.7	26	56.5	4.61	7.96

### 2.2 试验装置

试验主体采用有机玻璃试验模型筒,模型筒中心设有直径 2 cm 的圆孔供安装电渗阴极以出流排水。模型筒有机玻璃壁厚 1 cm,内部半径 19 cm,筒高 30 cm。试验用电渗阴极采用直径 16 mm、均匀密钻小孔的有机玻璃管外依次包裹反滤土工布并捆扎细铁丝制成。电渗阳极采用直径 8 mm 的光圆钢筋和金属圆环焊接制成,圆环内径 16 cm,均匀焊接 8 根长度 30 cm 的光圆钢筋。电渗阳极、阴极

以及有机玻璃模型筒同轴布置。电渗试验过程中，土体中的水分由阳极区向阴极汇集，并经试验筒的中心小孔排出。

试验用电源采用固纬 SPD - 3606 稳压直流电源，可提供最大 120 V 的输出电压或最大 12 A 的输出电流。电源能够实时显示电路中的即时电流值与电压值。

### 2.3 模型安装

将配制好的土样静置 24 h 后，如图 1 所示，按下述安装步骤进行模型安装。

处于密实状态。在集水孔下端布置量筒，并按照试验电路图设置要求将电极、电源用导线连接起来。最后，根据试验方案施加电压开始电渗排水。

试验用量测装置中，采用量筒量测电渗流量，由于试验中同时进行了低能量强夯与电渗联合作用试验和电渗单独试验共 2 组试验。在上述模型安装基础上，当进行低能量强夯与电渗联合作用试验时，土体表面上铺设了一层土工织物，并在土工织物上铺设了 1 cm 厚的砂垫层，以满足低能量强夯加固软黏土时所需的施工工艺。图 2 给出了试验安装实物图。

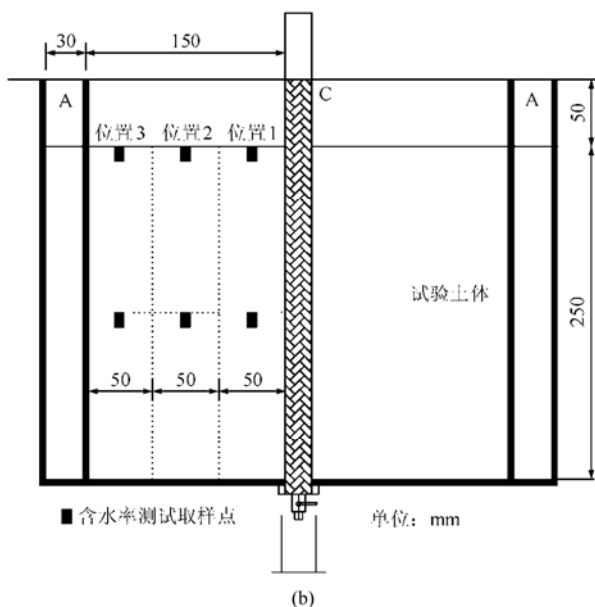
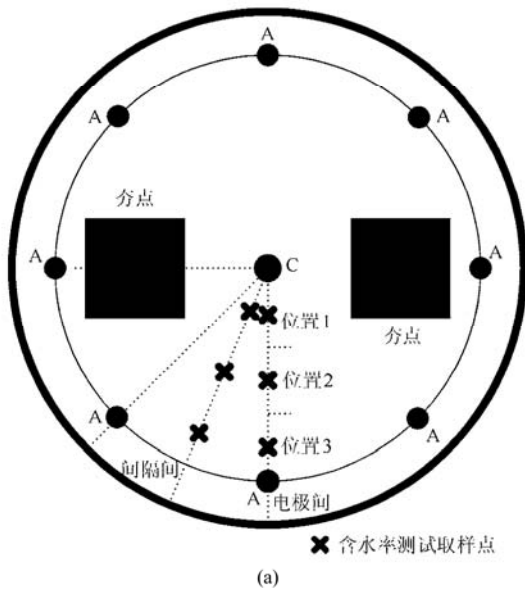


图 1 模型安装示意图及土体测试与取样位置  
Fig.1 Model setup and positions for measurement

首先，将电渗电极适当湿润。之后，在试验筒中安装电极，并分层装填土样，小心挤压以使土样

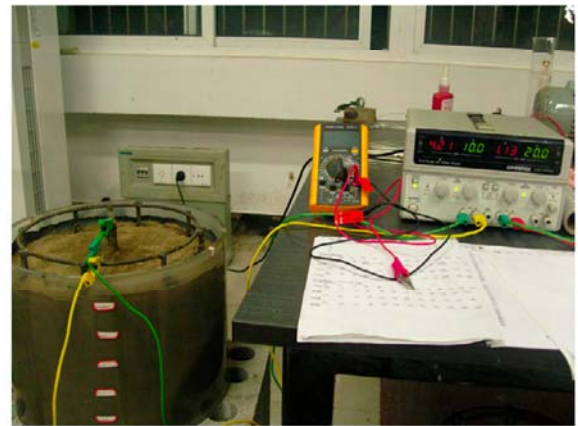


图 2 模型安装实物图  
Fig.2 Installed model

### 2.4 试验方案

#### (1) 夯锤设计

为使模型试验结果具有可靠性，需根据相似性准则设计模型尺寸，参照熊巨华等<sup>[16]</sup>中的模型参数设计方法，选择参数夯击能  $E$ 、锤重  $G$ 、落距  $h$ 、夯击次数  $N$ 、锤底面积  $A$ 、土的含水量  $w$ 、干重度  $\gamma_d$ 、加固深度  $H$  建立方程：

$$f(E, G, h, N, A, w, \gamma_d, H) = 0 \quad (1)$$

锤重  $G$ 、落距  $h$ 、夯击次数  $N$  为相互独立的物理量，根据  $\pi$  定理，由量纲分析法求出各量纲一的群：

$$f\left(\frac{E}{Gh}, G, h, N, \frac{A}{H^2}, w, \frac{\gamma_d h^3}{G}, \frac{H}{h}\right) = 0 \quad (2)$$

由此可得

$$\left. \begin{aligned} \frac{C_E}{C_G C_h} = 1, C_N = C_w = 1 \\ \frac{C_A}{C_h^2} = 1, \frac{C_H}{C_h} = 1, \frac{C_{\gamma_d} C_h^3}{C_G} = 1 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

则确定落距相似系数  $C_h$ 、锤重相似系数  $C_G$ ，其他参数便可确定。设

$$C_h = q, C_G = p \quad (4)$$

则

$$C_E = pq, C_A = q^2, C_{\gamma_d} = \frac{p}{q^3} \quad (5)$$

本次试验选取  $C_h = 20$ ，则  $C_G = 8\ 000$ ，模拟能级为 1 000, 400, 200, 100 kN·m 的夯击，根据模型试验的相似第二定理和量纲分析方法，模型试验参数如表 2 所示。

表 2 模型试验参数

Table 2 Parameters of model test

强夯能级/ (kN·m)	类别	能级/ (kN·m)	锤重/kN	落距/m	夯锤尺寸/ (m×m)
1 000	原型	1 000	100	10.00	1.500×1.500
	模型	6.25×10 <sup>-3</sup>	0.012 5	0.50	0.075×0.075
400	原型	400	100	4.00	1.500×1.500
	模型	2.5×10 <sup>-3</sup>	0.012 5	0.20	0.075×0.075
200	原型	200	100	2.00	1.500×1.500
	模型	1.25×10 <sup>-3</sup>	0.012 5	0.10	0.075×0.075
100	原型	100	100	1.00	1.500×1.500
	模型	6.25×10 <sup>-4</sup>	0.012 5	0.05	0.075×0.075

针对 200, 100 kN·m 的强夯能级，制作试验用夯锤，设置如表 3 所示的强夯参数。选取如图 1 所示的 2 个夯点，强夯时采取低能量跳夯加满夯平整的强夯方式，低能量跳夯时每个夯点共夯击 2 次。

表 3 强夯参数

Table 3 Dynamic compaction parameters

强夯能级类别	夯锤重/N	尺寸/ (cm×cm)	夯点数	每点夯击数	落距/m	夯击方式
I(200 kN·m)	12.5	7.5×7.5	2	2	0.10	低能量跳夯
II(100 kN·m)	12.5	7.5×7.5	2	2	0.05	满夯平整

(2) 试验过程设计

此次软黏土电渗固结试验共设置 2 组对比试验，各组试验的方案如表 4, 5 所示。EK - C 为对比试验，只进行单纯的轴对称电渗固结试验，EK - H 为低能量强夯与轴对称电渗联合加固试验。EK - H 与 EK - C 的电压方案相同，不同之处为 EK - H 在试验进行到 24 h 后，开始了低能量强夯试验，低能量强夯方案如表 5 中强夯方案所示，每间隔 6 h 强夯一次，每次强夯均采用低能量跳夯加满夯平整的强夯方式。试验进行到第 4 天时，由于电压方案的改变，为区别电渗与强夯的影响，强夯分别于 78, 90 h 各进行一次。

表 4 电压方案

Table 4 The schemes of voltage

试验组次	通电时间 t/h	电压/V		
		0~72 h	72~84 h	84~96 h
EK - C	96	10	15	20
EK - H	96	10	15	20

表 5 强夯方案

Table 5 The schemes of dynamic compaction

试验组次	通电时间 t/h	强夯方案			
		0~24 h	24~48 h	48~72 h	72~96 h
EK - C	96	-	-	-	-
EK - H	96	-	采用能级 I 在 24, 30, 36, 42 h 各强夯一遍，每遍强夯后采用能级 II 满夯平整	采用能级 I 在 48, 54, 60, 66 h 各强夯一遍，每遍强夯后采用能级 II 满夯平整	采用能级 I 在 78, 90 h 各强夯一遍，每遍强夯后采用能级 II 满夯平整

试验开始前，测量土样的初始含水率、界限含水率、pH 值、电导率以及干燥的电渗电极质量等参数。试验过程中，间隔 1 h 记录一次土体中电流强度、电势变化以及电渗出流量，定时拍照记录土样产生的明显变化。试验结束后，进行含水率、土体 pH 值和电导率测试。根据试验方案确定含水率等指标测量取土位置时，将土体沿深度方向等分为 2 层，分别沿阴极到阳极方向等分为三段，在阴阳极连线间共 6 个区块，在相邻阴阳极连线的间隔间沿阴极向阳极的方向也等分为 3 段，则间隔间也包括 6 个区块。于第一层表面与第二层表面每段中心部位(共 12 处位置)取土进行含水率、土体 pH 值和土体电导率测试，每处取土不少于 40 g。

3 试验结果分析

3.1 电流强度

图 3 显示了试验 EK - H 与 EK - C 电路中电流强度曲线，从图中可以看出，不同试验方案作用下的各组试验中，各组试验电路中的电流强度均呈现出整体先增大后减小的变化规律，表明电渗早期的电流增大与土体成分的非均质特性有关，电渗早期的试验过程中，电流在土体中形成复杂的通路体系，形成的导电路径越多则电路中的电流越大，当电渗试验进行到后期，由于通路中土性的变化，导电路径受阻增多，电流强度值变小。

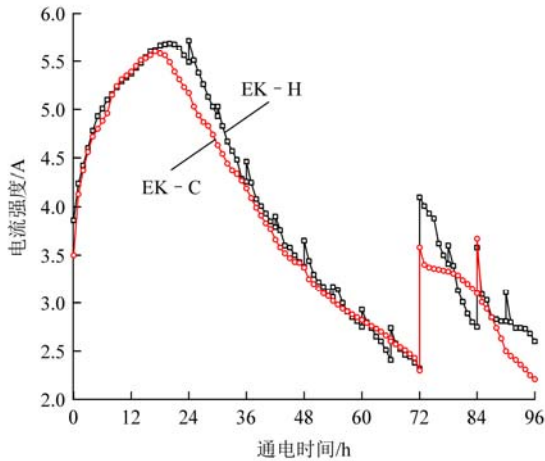


图3 电流强度曲线  
Fig.3 Curves of current intensity

由图3可知,进行低能量强夯与提高电渗电压均能够增加电路中的电流强度,两者相比,提高电渗电压引起的电流增加更为显著。除去电路中因低能量强夯及提高电渗电压引起的电流跳跃提升之外,电流变化曲线下落速度表现出较强的一致性,这表明了低能量强夯对电路中电流的整体发展趋势影响有限,除去强夯瞬间导致的电流突变增加,基本可忽略其可能产生的负面影响。试验EK-H与EK-C相比,前期电流变化表现稍好,中期下降略快,后期表现较好。这可能与前期低能量强夯作用下,土体较为致密,土体导电性较好有关;中期下降略快可能与前期电渗作用明显,土性变化相比试验EK-C较为剧烈,引起土体导电性下降较大有关;后期表现优于试验EK-C,这与试验EK-C后期土体开裂严重,导致电路电阻急剧增大关系密切。

综上所述,低能量强夯对电渗过程的电流变化具有一定的促进作用,强夯过程增强了土体致密性,提高了土体导电性。

### 3.2 出流量和含水率变化

图4显示了各组试验土体累积出流量与时间关系曲线。从图4可以看出,从试验EK-C的整体出流表现可以看出,单纯电渗试验过程中,出流情况表现出前期出流较大、后期逐渐降低并趋于稳定的发展规律,即使在试验最后24h内改变了电渗电压,电渗电压的改变也并未对试验出流造成明显影响,表明了试验EK-C中,电渗作用基本终止。试验EK-H出流表现的总体变化规律呈现出前期出流较大、后期减缓并逐渐增大的规律,但与试验EK-C相比,存在不同之处。在试验开始后的前

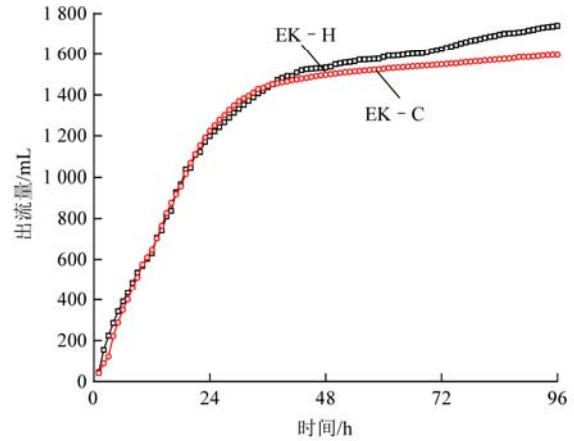


图4 土体累积出流量与时间关系曲线  
Fig.4 Relation curves between accumulated water flow and time

24 h内,2组试验由于试验条件相同,出流表现较为接近。但当试验进入后期,试验EK-H的出流强于试验EK-C,这表明试验EK-H中进行的低能量强夯增强了土体出流,这可能与强夯过程改善了土体内部形成的排水路径,在挤密的过程中,加速了土体的出流。试验最后24h内,当提高电渗电压时,试验EK-H的出流有所增强,这与试验EK-C不同,表明增加电渗电压仍能发挥作用,低能量强夯过程使得电渗作用得以继续发挥作用,并使得土体最终出流量多于试验EK-C。这与上述电流强度分析中原因类似,主要与低能量强夯过程增强了土体致密性有关。

从上述分析可以看出,低能量强夯过程能够提高土体致密性,弥补土体裂纹,增强电路电流,同时强夯挤密过程改善了土体排水路径,加速了土体出流,使得土体出流表现强于单纯电渗的情况。将上述分析与笔者试验过程中所观测到的现象结合起来可得出,低能量强夯与电渗法联合应用时需注意施工工艺的控制。低能量强夯时,着重强夯阳极区土体开裂处,不对阴极区土体进行强夯;在决定何时开始强夯以及如何选择夯点时,应当在土体突然出流变小且阳极区土体干燥时,选取阳极区土体干燥处作为夯点并开始强夯,待所有区域点夯完后,再针对阳极区土体进行低能量强夯,不对阴极区土体进行强夯处理。

图5显示了试验结束后不同位置土体含水率分布情况,土体含水率表现出阳极区含水率较低、越靠近电渗阴极土体含水率越高。从图5(a)可以看出,2组对比试验中电极间的土体含水率分布中,试验EK-H的一层土体各位置处含水率均低于EK-C,

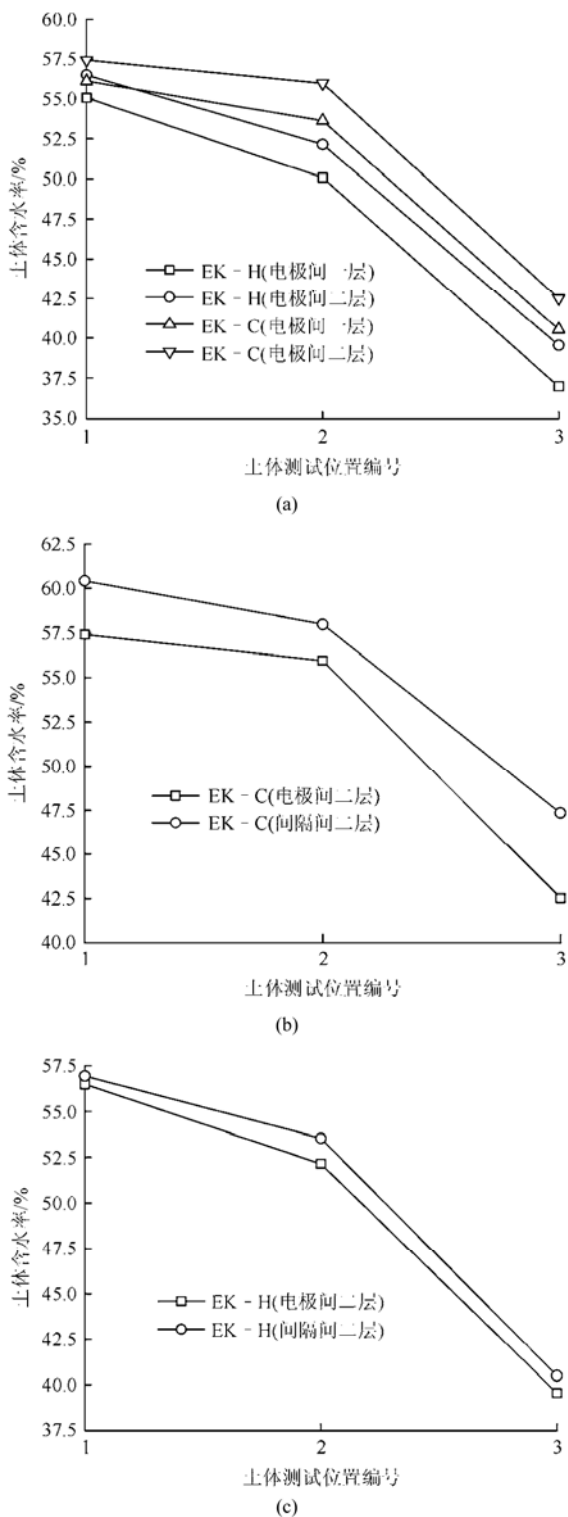


图 5 土体含水率分布  
Fig.5 Soil moisture distribution

且在阳极处较 EK - H 的含水率下降值大于阴极处，同时一层的含水率均小于二层土体。这主要由于 EK - H 中低能量强夯时，直接将能量释放于表层土体，使其土体挤密加速了水流，而二层土体获得能量较少，挤密作用较弱以致出流较少，并且针对阴极区土体进行强夯时，因土体的含水量高于达到规

定压实度所需要的含水量而无法排出水流，这也表明了针对阴极区土体进行低能量强夯是无效的。

然而，从试验 EK - H 与 EK - C 的二层土体含水率可以看出，因为试验 EK - H 总体出流量大于试验 EK - C，所以二层土体含水率值要低一些，表明试验 EK - H 深层土体加固效果是显著的。这表明了低能量强夯作用对深层土体加固具有较强的促进作用。具体从电渗排水和挤密排水两个方面来分析，一方面因低能量强夯改善了土体开裂，使得土体的电阻率降低，可以认为低能量强夯增强了试验 EK - H 的电渗排水作用；另一方面由于低能量强夯挤密土体的同时，改善了土中的排水路径，推动着土中水流向阴极移动，加速了出流。

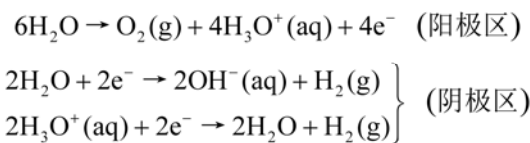
从图 5(b)可以看出，单纯轴对称电渗试验 EK - C 中，以二层土体含水率分布为例，相同位置处电极间土体含水率低于间隔间土体含水率，表明了轴对称电渗中，离开阴极相同距离处的土体，存在着电极间土体与间隔间土体环向处理不均匀的问题。从图 5(c)可以看出，试验 EK - H 中，上述位置处存在的环向不均匀问题得到了较好的改善，这表明了低能量强夯能够改善轴对称电渗过程中环向土体处理的不均匀问题。

### 3.3 pH 值变化和土体电导率

利用含水率测试时在上述各位置所取的测试土样，在含水率试验结束后，将测试后的烘干土样制成粉末，取 10 g 土粉，以 1 : 5 的水土质量比配制悬浊液，用玻璃棒搅拌 1 min 后静置 0.5 h，取其上部清液进行 pH 值与土体电导率的测试。利用 PHS - 3C 型精密 pH 计进行 pH 值测试，利用 DDS - 11A 数显电导率仪进行土体电导率试验。

图 6 显示了几组具有代表性的试验土样中从位置 1~3 的土体 pH 值分布情况。土体 pH 值表现为由阳极到阴极依次升高的变化规律，阳极区所在位置 3 处土体 pH 值较初始值有所降低，表现出较强的酸性，靠近阴极的位置 1 处土体 pH 值较初始值升高，表现出较强的碱性。

主要是电渗过程发生电化学反应，该反应主要包含以下情况<sup>[4]</sup>：



上述反应中，在阳极区(位置 3)产生阳离子

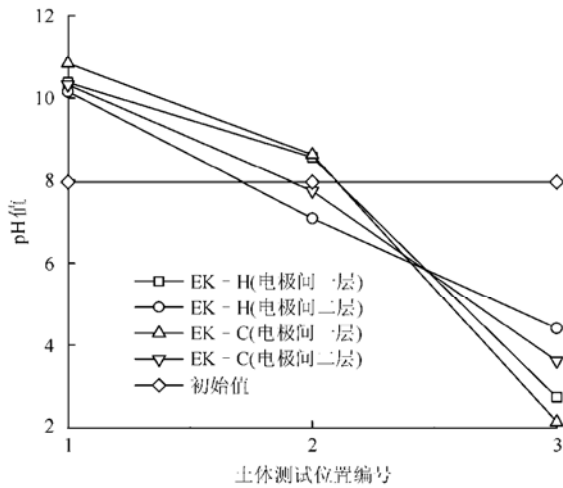


图6 土体 pH 值  
Fig.6 pH values of soil

H<sub>3</sub>O<sup>+</sup>, 同时阳极区产生并释放出氧气; 阴极区(位置 1)产生离子 OH<sup>-</sup>, 同时阴极区产生并释放出 H<sub>2</sub>。

从图 7 可以看出, 试验 EK - C 与试验 EK - H 中, 一层土体 PH 值变化均大于二层土体。此外, 由于试验 EK - H 土体出流量较试验 EK - C 要大, 裹挟出大量的碱性反应物, 故位置 1 处土体 pH 值较小一些, 这表明了阴极出流能够促进阴极区碱性反应物的排出。但在位置 3 处土体 pH 值较高一些, 那是由于低能量强夯时改善了土体的电流, 加速了阳离子 H<sub>3</sub>O<sup>+</sup>向阴极迁移。

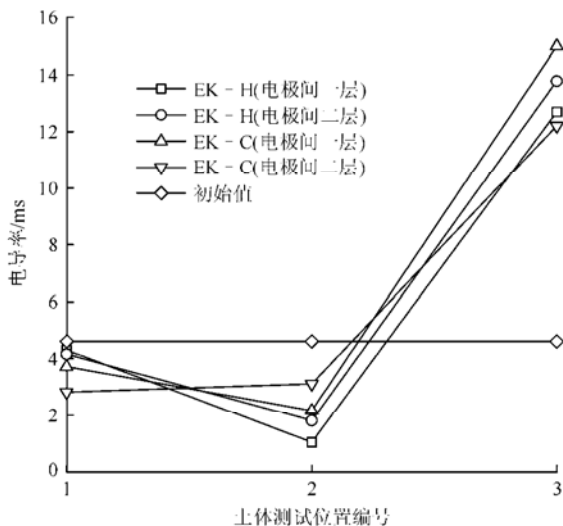


图7 土体电导率  
Fig.7 Electrical conductivity of soil

图 7 显示了几组具有代表性的试验土样中从位置 1~3 的土体电导率值情况。由于电渗过程发生电化学反应, 土体电导率值表现为阳极区所在位置 3

处土体电导率值较初始值变大, 这与金属阳极腐蚀, 金属阳离子向阴极移动, 与阳极区土体结合有关; 靠近阴极的位置 1, 2 处土体电导率值较初始值降低, 主要是由于电渗过程中阴极区发生电化学反应形成较多的碱性难溶物。

从图 7 还可以看出, 除试验 EK - C 中电极间 2 层土体外, 其余部位土体的电导率值最低值在位置 2 而非位置 3, 这表明了电渗过程中产生的导电性较低的物质在土体中的迁移受阻, 未能经阴极排水有效排出而积聚在土样中心部位。在位置 3(阳极处)试验 EK - H 中电极间一层土体的电导率小于试验 EK - C, 位置 1(阴极处)电极间一层土体的电导率也小于试验 EK - C。那是由于低能量强夯加剧了电渗排水的作用, 加强了土中金属阳离子等导电性较高的物质向阴极移动, 并从阴极排出, 同时在阴极处形成了大量的碱性难溶物, 从而降低了位置 3 和位置 1 的电导率。试验 EK - H 中电极间二层土体的电导率也表现出了类似的规律。试验 EK - C 中电极间二层土体电导率值最小值位于位置 1, 反映了电渗加固过程中, 阴极排水有效性十分重要, 关系到土体电路中电导率较低的物质能否及时排出, 进而降低电路电阻值, 增进电渗效率。

### 3.4 阳极腐蚀量和土体性状分析

图 8 给出了各组试验中阳极质量减小值, 此处定义为阳极腐蚀量。将试验 EK - H 与 EK - C 的阳极腐蚀量相比可见, 试验 EK - H 的阳极腐蚀量更低, 那是由于低能量强夯时改善土中的排水路径, 充填了电渗作用产生的裂隙, 降低了土体的电阻率, 因而用于电渗排水的作用得到了增强, 而削减了电化学反应对阳极的腐蚀。这表明了低能量强夯法与

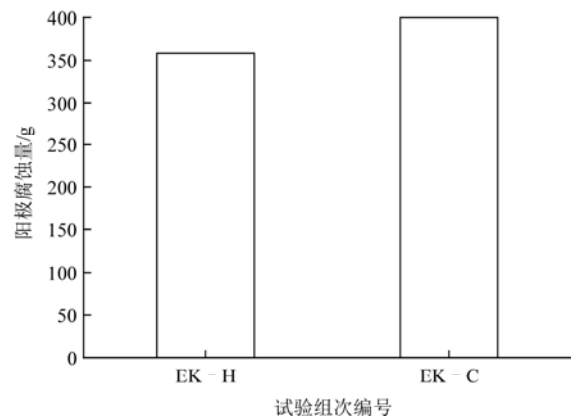


图8 阳极腐蚀量  
Fig.8 Mass of corroded anode

电渗法联合应用时,能阻止阳极腐蚀量的增加。

图9给出了试验后土体性状,从图中可以看出,试验EK-C中,当试验结束后,土体表明裂缝发展剧烈,这将导致电路中电阻的急剧增加,并不利于后期土体的开发利用。相比试验EK-C,试验EK-H中,土体表面较为平整密实,且土体沉降值明显增加,这表明了低能量强夯对土体密实及沉降发展作用明显。



(a) EK - C



(b) EK - H

图9 试验后土体性状

Fig.9 Surface features of soil after test

## 4 结 论

通过本文的试验与分析,可得出以下有关低能量强夯与电渗法联合作用的结论:

(1) 联合作用中,低能量强夯过程提高土体致密性,弥补土体裂纹,增强电路电流,但同时强夯过程改善了土体排水路径,使得土体出流表现强于单纯电渗的情况。

(2) 低能量强夯与电渗法联合应用时需注意施工工艺的控制,低能量强夯时,应着重强夯阳极区土体开裂处,不对阴极区土体进行强夯;在决定何时开始强夯以及如何选择夯点时,应当在土体突然出流变小且阳极区土体干燥时,选取阳极区土体干燥处作为夯点并开始强夯,待所有区域点夯完后,再针对阳极区土体进行低能量满夯,不对阴极区土体进行加固处理。

(3) 轴对称电渗中,离开阴极相同距离处的土体,存在着电极间土体与间隔间土体环向处理不均匀的问题,低能量强夯作用能够改善上述环向土体处理的不均匀问题。

(4) 不管是单独的轴对称电渗,还是联合作用,阴极排水有效性十分重要,关系到土体电路中pH值和导电率变化以及影响电路电阻值和电渗效率。

(5) 低能量强夯法与电渗法联合应用时,阳极腐蚀量较少,对土体密实及沉降发展作用明显。

## 参考文献(References):

- [1] 曹永华,高志义,刘爱民.地基处理的电渗法及其进展[J].水运工程,2008,(4):92-95.(CAO Yonghua, GAO Zhiyi, LIU Aimin. Characteristics and development of electro-osmotic treatment for ground improvement[J]. Port and Waterway Engineering, 2008, (4): 92-95.(in Chinese))
- [2] ESRIG M I. Pore pressure, consolidation and electrokinetics[J]. Journal of the SMFD, 1968, 94(SM4): 899-921.
- [3] SU J Q, WANG Z. The two-dimensional consolidation theory of electro-osmosis[J]. Geotechnique, 2003, 53(8): 759-763.
- [4] ZHUANG Y F, WANG Z. Interface electric resistance of electroosmotic consolidation[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2007, 133(12): 1617-1624.
- [5] 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.
- [6] GLENDINNING S, JONES C J F P, PUGH R C. Reinforced soil using cohesive fill and electrokinetic geosynthetics[J]. International Journal of Geomechanics, ASCE, 2005, 5(2): 138-146.
- [7] 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(22): 287-302.
- [8] 李瑛,龚晓南,焦丹,等.软黏土二维电渗固结性状的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2009,28(增2):4034-4039.(LI Ying,



- GONG Xiaonan, JIAO Dan, et al. Experimental study on two-dimensional electro-osmotic consolidation of soft clay[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(Supp.2): 4 034 - 4 039.(in Chinese))
- [9] 曹永华, 高志义. 电渗法中排水固结理论与实践的若干问题[J]. 中国港湾建设, 2010, (1): 22 - 24.(CAO Yonghua, GAO Zhiyi. Some problems on theory and application of drainage consolidation in electroosmotic for ground improvement[J]. China Harbour Engineering, 2010, (1): 22 - 24.(in Chinese))
- [10] 郑颖人, 陆新, 李学志, 等. 强夯加固软黏土地基的理论与工艺研究[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(1): 18 - 22.(ZHENG Yingren, LU Xin, LI Xuezhi, et al. Research on theory and technology of improving soft clay with DCM[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(1): 18 - 22.(in Chinese))
- [11] 赵建国, 朱文凯. 电渗 - 强夯综合法加固软土地基的实践[J]. 地质与勘探, 1994, 30(2): 76 - 80.(ZHAO Jianguo, ZHU Wenkai. A practice consolidating soft formations with an electric osmosizing-strong ramming composite method[J]. Geology and Prospecting, 1994, 30(2): 76 - 80.(in Chinese))
- [12] 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, (1): 43 - 47.(LIU Fengsong, LIU Yundong. Application of combined weak soil improvement technology of vacuum preloading-dewatering by electro-osmosis-low energy dynamic compaction to improve soft soils[J]. China Harbour Engineering, 2008, (1): 43 - 47.(in Chinese))
- [13] 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, (1): 30 - 36.(LIAO Jingtang, LIAO Hongzhi. Water level lowering technique using vacuum electrical point well and low energy dynamic compaction on soft ground of berth 5 and 6 of shatian port zone of humen port[J]. South China Harbour Engineering, 2009, (1): 30 - 36.(in Chinese))
- [14] 高有斌, 曾国海, 徐步兴, 等. 双控动力固结法加固软黏土地基的应用研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2009, 29(6): 632 - 637.(GAO Youbin, ZENG Guohai, XU Buxing, et al. Research on application of double-control dynamic consolidation method in strengthening soft clays[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2009, 29(6): 632 - 637.(in Chinese))
- [15] BURNOTTE F, LEFEBVRE G, GRONDIN G. A case record of electroosmotic consolidation of soft clay with improved soil-electrode contact[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2004, 41(6): 1 038 - 1 053.
- [16] 熊巨华, 胡斌, 冯世进, 等. 强夯法加固粉土地基室内模型试验研究[J]. 世界地震工程, 2010, 26(增): 241 - 246.(XIONG Juhua, HU Bin, FENG Shijin, et al. Model test study on silt foundation improvement by dynamic compaction[J]. World Earthquake Engineering, 2010, 26(Supp.): 241 - 246.(in Chinese))

## 简讯：《岩石力学与工程学报》优先出版平台上线

为了加快科学信息的传播速度、保护作者知识产权, 自2014年12月起, 《岩石力学与工程学报》采用“中国知网”学术期刊数字出版平台优先出版本刊学术论文, 以便广大读者第一时间了解和下载本刊拟刊发的最新研究成果。每篇论文均对应唯一网址, 作者在引用时请标注其网址。