

DOI: 10.16285/j.rsm.2021.1746

絮凝-电渗法联合治理淤泥质土试验研究

杨佳乐^{1,2}, 李双洋², 刘德仁¹, 王旭¹, 朱怀太^{1,2}, 徐硕昌¹

(1. 兰州交通大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 中国科学院西北生态环境资源研究院 冻土工程国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 针对传统电渗法治理淤泥质土过程中排水效率低且治理后土体不均匀等问题, 从改变软黏土颗粒自身持水特性角度出发, 提出采用新型有机高分子材料阴离子型聚丙烯酰胺 (APAM) 联合电渗法治理淤泥质土的思路。利用自制的一维电渗固结试验装置, 探究絮凝-电渗法联合作用机制以及不同絮凝剂掺入比对电渗排水加固效果的影响规律。试验结果表明: 与传统电渗法相比较, 絮凝剂 APAM 的掺入减少了软黏土颗粒表面的结合水膜厚度, 使得淤泥质土的前期电渗排水速率和累计排水量显著提升, 从而降低了电渗法的平均能耗系数; 同时, 絮凝剂高分子长链的“吸附架桥”作用增强了土颗粒的黏结力和絮凝沉积效果, 有效缓解了电渗过程中细小黏粒迁移集聚而造成的阴极淤堵问题; 治理后淤泥质土的抗剪强度大幅增高, 土体的均匀性也得到了明显改善, 且当絮凝剂 APAM 掺入比为 0.30% 时, 土体的电渗排水固结效果最佳。

关键词: 淤泥质土; 絮凝; 电渗法; 掺入比; 加固效果

中图分类号: TU 447

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2022) 10-2861-12

Experimental study on the treatment of muddy soil using flocculation combined with electro-osmosis method

YANG Jia-le^{1,2}, LI Shuang-yang², LIU De-ren¹, WANG Xu¹, ZHU Huai-tai^{1,2}, XU Shuo-chang¹

(1. School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou, Gansu 730070, China; 2. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou, Gansu 730000, China)

Abstract: In order to solve the problems of low drainage efficiency and uneven consolidation effect of muddy soil during traditional electro-osmotic drainage process, a new idea of using anionic polyacrylamide (APAM) combined with electro-osmosis method to treat muddy soil was developed from the perspective of changing the water holding characteristics of soft clay particles. The self-made one-dimensional electro-osmotic consolidation test device was used to explore the mechanism of flocculation-electroosmosis method and the influence of different mixing ratios of flocculant on the reinforcement effect. The results show that APAM reduces the thickness of the bound water film on surface on soft clay particles as compared with the traditional electroosmosis method, significantly improves the early electroosmotic drainage rate and cumulative drainage of muddy soil, thus lowering the average energy consumption coefficient of electro-osmotic method. Meanwhile, the “adsorption bridging” effect of the macromolecule long chain of flocculant enhances the cohesive force and flocculation deposition effect of soil particles, which effectively alleviated the cathode clogging caused by the migration and agglomeration of fine clay particles. The shear strength of muddy soil was increased greatly after treatment, and its uniformity was also significantly improved. When the mixing ratio of the flocculant APAM was 0.30%, the highest efficiency of electro-osmotic drainage and the optimal consolidation effect of muddy soil were achieved.

Keywords: muddy soil; flocculation; electro-osmosis method; mixing ratio; consolidation effect

1 引言

淤泥质土属于典型的欠固结软弱土, 具有含水率高、渗透性差、压缩性高、承载能力低等不利工

程特性, 作为地基填料使用时必须先对其进行排水加固处理。常规的处理手段如堆载预压和真空预压等常受限于土体水力渗透系数, 导致排水效率低且深层土体固结不足。但电渗透系数与土体粒径无关,

收稿日期: 2021-10-17

修回日期: 2022-06-22

基金项目: 中国科学院重点部署项目 (No. ZDRW-ZS-2020-1); 国家自然科学基金 (No. 42071092); 中国科学院青年创新促进会项目 (No. Y201975)。This work was supported by the Key Research Program of the Chinese Academy of Sciences (ZDRW-ZS-2020-1), the National Natural Science Foundation of China (42071092) and the Youth Innovation Promotion Association CAS (Y201975).

第一作者简介: 杨佳乐, 男, 1997年生, 硕士研究生, 主要从事岩土工程及特殊土处理的研究。E-mail: jlyang5110@163.com

通讯作者: 李双洋, 男, 1980年生, 博士, 研究员, 主要从事冻土力学与寒区岩土工程等方面的教学和科研。E-mail: Lisy@lzb.ac.cn

且在细粒土中远大于水力渗透系数^[1-2]。因此,电渗法是一种加速淤泥质土排水固结的有效方法。

1949 年, Casagrande^[3]首次将电渗法应用在某铁路路基挖方工程实例中,取得良好的工程治理效果。自此以后,学者们从电渗固结理论、室内机制试验和实际工程应用等方面开展了大量的研究工作。但电渗法的高能耗、电极腐蚀严重、后期排水效率低和通电处理后土体不均匀等问题一直限制了其在工程实际中的广泛应用^[4]。针对以上技术缺陷,学者们分别从电极材料^[5-7]、电极布置^[8]、通电形式^[9-10]等方面对电渗排水方法进行了优化,但实际应用的有效性和可行性仍有待进一步检验。与此同时,以上传统单一电渗法在试验后期的排水固结效果欠佳,因此,众多联合处理方法被相继提出以提高土体的电渗排水速率。研究表明电渗法联合低能量强夯法能够弥补土体裂缝,有效减少电渗后期土体的界面电阻率^[11]。此外,将真空预压与电渗法联合作用可解决通电排水高能耗问题,但土中部分细小颗粒会迁移集聚在塑料排水板附近,形成致密的不透水“土柱”^[12-13],反而降低了电渗排水效率,加剧了治理土体的不均匀性。因此,在电渗过程中如何成功絮凝细小且分散的胶体颗粒以提升高含水率土体的排水固结效果成为了行业内的研究热点。

从改变软黏土颗粒自身性状的角度着手, Moayedi 等^[14]研究了电渗过程中掺入硅酸钠(Na_2SiO_3)、氧化钙(CaO)、氢氧化铝($\text{Al}(\text{OH})_3$)和氯化钙(CaCl_2)等无机化学溶液对土体表面电荷、电流密度、电渗流及能量消耗的影响规律,结果表明,外掺剂的加入增加了土中阳离子浓度,利用电荷中和作用促使胶体颗粒表面的双电层扩散层厚度变薄,有效提高了土体电渗排水效果。袁国辉等^[15]提出采用无机絮凝剂 CaCl_2 联合逐级加压电渗法改良疏浚淤泥,通过改变悬浮颗粒的电动电势从而絮凝沉积,显著增大了疏浚淤泥水分出流能力,缩短了电渗治理时间。同时利用逐级加压方式解决了电渗高能耗问题,联合治理后土体整体差异性较小且阳极腐蚀程度低。刘飞禹等^[16]选用无机絮凝剂 FeCl_3 和 $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ 处理河道疏浚淤泥,结果表明絮凝剂掺入对电渗排水效果有明显影响,并从双电层理论和 Stern 双电层模型角度揭示了最佳掺入比的作用机制。在此基础上, Hu 等^[17]研究了 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、 FeCl_3 和 NaCl 共 3 种添加剂对电渗-真空预压联合作用的影响。但上述无机絮凝剂大多为多价金属无

机盐,使用生成的金属氢氧化物有毒,且排出水中的残留金属浓度偏高,对生态环境造成了不可逆的二次破坏。

沿袭絮凝-电渗法联合处治疏浚淤泥的思路,综合考虑高效治理与生态防护兼并的工程原则,绿色环保型有机高分子材料聚丙烯酰胺成为电渗絮凝剂的不二选择。阴离子型聚丙烯酰胺(APAM)因其用量少及絮凝效果好已在尾矿脱水和絮凝-真空预压处理软土领域得到广泛使用^[18-21],但在淤泥质土电渗排水加固方面研究较少^[22]。絮凝-电渗法联合作用机制主要分为两个部分,即絮凝剂对黏土颗粒持水特性的改变和电渗法的定向排水作用。首先利用 APAM 的电荷中和及分子长链“吸附架桥”作用,吸附悬浮的细小固体土颗粒快速脱水絮凝沉积,随后在土体两端施加电压进行电渗排水固结。二者相辅相成,既增强了土体排水固结效果,又降低了过多的电渗能耗,改善了治理后土体不均匀等难题。本文通过设计多组室内模型试验,以探究新型絮凝剂 APAM 不同掺入比对电渗排水固结效果的影响规律,以期对日后工程实际应用提供参考。

2 试验材料与方法

2.1 试样材料

试验土样取自“引大入秦”工程兰州新区段某渗漏输水渠道基底,原状土样的基本物理参数见表 1。经烘干碾压后过 2 mm 筛,测得土样粒径分布曲线如图 1 所示,其中砂粒($0.075 \text{ mm} < d \leq 2 \text{ mm}$)含量占 4.57%,粉粒($0.005 \text{ mm} < d \leq 0.075 \text{ mm}$)含量占 77.09%,黏粒($d \leq 0.005 \text{ mm}$)含量占 18.34%。土样中以细小粉黏粒为主,导致自身渗透性低,在自重和常规处理手段下很难完成排水固结。

本次试验选用线性有机高分子聚合物阴离子型聚丙烯酰胺(APAM)作为絮凝剂,由国药集团化学试剂有限公司生产。如图 2 所示,常温下为白色颗粒状,热稳定性较好,易溶于水且呈均匀透明的黏稠液体,无毒,无腐蚀性。密度为 1.302 g/cm^3 ,固含量大于 90%,平均分子量大于 1 000 万。

表 1 土样的基本物理参数
Table 1 Basic physical parameters of soil sample

w /%	G_s	e	w_p /%	w_L /%	I_p	C_u /kPa	k /($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)
30.25	2.71	1.68	20.56	39.84	19.28	≈ 0	1.63×10^{-6}

注: w 为天然含水率; G_s 为土粒相对密度; e 为孔隙比; w_p 为塑限; w_L 为液限; I_p 为塑性指数; C_u 为抗剪强度; k 为渗透系数。

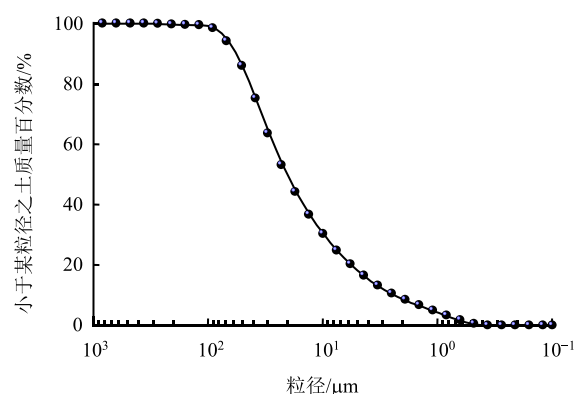


图 1 土样粒径分布

Fig.1 Grain-size distribution of soil sample

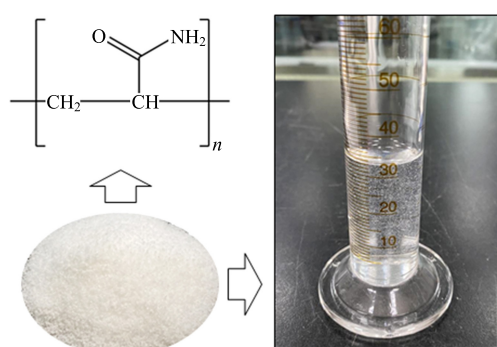


图 2 阴离子型聚丙烯酰胺

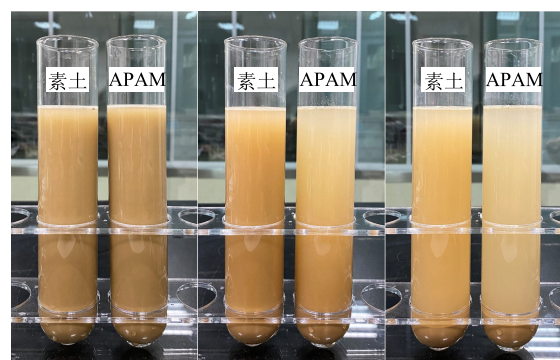
Fig.2 Anionic polyacrylamide (APAM)

絮凝剂的掺入可显著提高淤泥质土的电渗排水固结效果。为了更加直观地反映出絮凝剂 APAM 的疏水絮凝能力,设计了一组“摇晃静置”的对照试验。如图 3 所示,取少量试验干土样加入试管水溶液中,左侧为纯素土溶液(对照组),右侧为添加少量絮凝剂 APAM 的试样溶液。通过反复搅拌摇晃后垂直摆放在试管架上静置。由于絮凝剂 APAM 的快速脱水能力,选择静置 0、2、5 min 后观察固体土颗粒的絮凝效果。从图 3(a)中可以看出,初始时刻,两组试管溶液均呈浑浊状态。随着絮凝剂 APAM 的水解反应,试样溶液中细小且分散的土颗粒絮凝沉降,由上而下溶液逐渐澄清。由图 3(c)可知,静置 5 min 后试样溶液基本澄清,对照组溶液中土颗粒发生少许沉积,但其浑浊程度远大于试验溶液,证明絮凝剂 APAM 的疏水絮凝效果显著。

2.2 试验装置

试验采用自制的一维电渗固结试验装置,如图 4 所示。装置主体由试样槽和集水槽两部分组成,二者通过下部缺口的有机玻璃板隔开。试样槽净尺寸为 200 mm×100 mm×100 mm,集水槽净尺寸为 100 mm×35 mm×100 mm,集水槽底部设置有直径为 10 mm 的出水口,下方放置量筒记录排水量。阴

阳电极均采用受腐蚀影响较小的铁板,电极尺寸为 100 mm×100 mm×5 mm,其中阴极铁板均匀打孔过流,并用反滤土工布包裹防止土体流失。



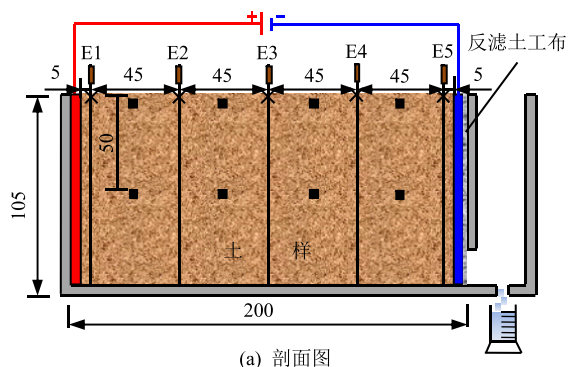
(a) 静置 0 min

(b) 静置 2 min

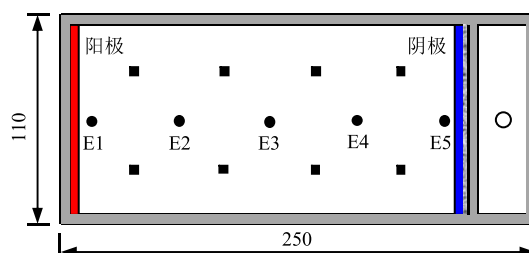
(c) 静置 5 min

图 3 絮凝效果示意图

Fig.3 Schematic diagram of flocculation effect



(a) 剖面图



(b) 平面图

注: ● 电势测针; ■ 含水率、抗剪强度测点; × 沉降测点。

图 4 一维电渗固结试验装置(单位: mm)

Fig.4 Apparatus designed for one-dimension electro-osmosis consolidation (unit: mm)

采用稳压直流电源 MP6020D 给电极持续稳定供电,输出电压 0~60 V 可调,电流 0~20 A 可调,功率为 1 200 W。沿长度方向等间距布置电势测针,测量电渗过程中土体电势分布,测点编号 E1~E5。土体抗剪强度 C_u 测量采用室内微型十字板剪切仪,型号为 PS-VST-MDE,十字板头为标准尺寸 $\Phi 25.5$ mm,测量范围为 0~100 kPa,测量精度为 1 kPa。

2.3 试验方案

电渗试验的电压选择尤其重要,电压太小无法形成有效的电势场,电压太大容易引起电能过量耗费以及电极腐蚀严重。目前,电渗试验采用的电势梯度范围在 $0.1 \sim 2.0$ V/cm 之间,李瑛^[23]研究得出,室内电渗试验的最佳电势梯度为 1.25 V/cm。因此,电极两端施加的电源电压选择为 25 V。为了研究新型絮凝剂 APAM 对电渗排水效果的影响规律,本文选择 0% 、 0.05% 、 0.15% 、 0.30% 、 0.50% 共 5 种掺入比(絮凝剂质量与干土质量之比)和一组不施加电压的对照组。试验时间依照电渗后期排水速率的变化情况而定,具体试验方案如表 2 所示。

表 2 试验方案
Table 2 Test scheme

试验 编号	絮凝剂	掺入比 /%	掺入质量 /g	通电电压 /V	试验时间 /h
T1	APAM	0.00	0.0	25	24
T2	APAM	0.05	1.3	25	24
T3	APAM	0.15	2.6	25	24
T4	APAM	0.30	7.8	25	24
T5	APAM	0.50	13.0	25	24
T6	APAM	0.30	7.8	0	24

2.4 试验步骤

(1) 依照自制试样槽的净体积和原状土样密度,计算各组试验所需干土质量为 2.6 kg。将 APAM 定量加入蒸馏水中稀释后均匀添加在干土样中,配制含水率为 40% 的饱和流塑状电渗土样,充分拌合后密闭静置 12 h。

(2) 试样槽内壁涂抹凡士林,方便电渗试验后取出完整土样。电极铁板称重后放置于试样槽中,将配制土样分层填入后在出水孔正下方设置量筒,并定点布置电势测针。试验装置顶部封闭,避免土体水分蒸发对试验结果造成影响。

(3) 利用导线将阴阳电极与稳压直流电源连接后接通电源,每隔 1 h 记录电流强度、有效电势和排水量。

(4) 通电结束后,观察并记录土体沉降和裂缝开展情况。如图 4 所示,测量关键位置点土体的抗剪强度和含水率,同时,按图 5 所示沿电势测针(E1~E5)所在纵向剖面等间隔分层取样,同步测试土体含水率的二维平面分布。

(5) 取电势测针 E3 周围的完整土样,待自然风干后喷金镀膜进行扫描电镜(SEM)试验,采用 JSM-5600 LV 型扫描电子显微镜,分辨率为 3.5 nm。最后将阴阳电极取出称重测其腐蚀量。

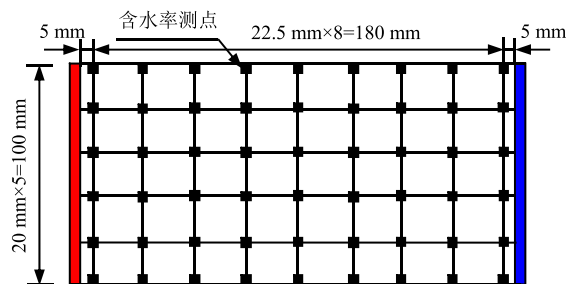


图 5 纵向剖面含水率测点分布

Fig.5 Distribution of measuring points of moisture content along longitudinal section

3 试验结果和分析

新型有机絮凝剂 APAM 的加入改变了黏粒的持水特性,进而影响了淤泥质土的电渗排水固结效果。因此,本文选择从排水量、电流强度与有效电阻、电渗能耗、含水率、抗剪强度、土体性状与电极腐蚀、微观结构等多维度进行全面分析,以探究絮凝-电渗法联合处理淤泥质土的作用机制并提出 APAM 的最优掺入比。

3.1 排水量

排水量是评价絮凝-电渗法联合治理淤泥质土效果最直接的指标。如图 6 所示,累计排水量随着通电时间的延长而增加,排水速率恰好相反。根据排水量和排水速率的变化趋势,可将整个电渗排水过程分为两个阶段:快速排水阶段和稳定排水阶段。已有研究表明,电渗排水速率与土体中导电离子浓度及运动速度密切相关,且土壤导电性能随着含水率的减小而降低^[6]。在通电初始阶段,土中导电离子运动速度较快,排水效果显著。但随着土体含水率大幅降低,导电离子活度逐渐降低,加之土体中裂缝生成和电极氧化腐蚀,致使土体电阻率迅速上升,排水速率逐渐减小并趋于稳定。考虑到重力对淤泥质土脱水固结的影响,补充一组添加 0.3% APAM 但不通电的试验对照组 T6,最终累计排水量为 80 mL,由此可证明电场力在淤泥质土电渗排水固结过程中起主导作用,重力影响甚微。

相较于传统单一电渗排水法,絮凝剂 APAM 的掺入可显著提高淤泥质土的电渗排水速率。如图 6 所示, T1~T5 的最终累计排水量分别为 220 、 260 、 308 、 356 、 270 mL,不同絮凝剂掺入比工况 T2~T5 较 T1 分别提高了 18.2% 、 40.0% 、 61.8% 和 22.7% 。絮凝剂 APAM 的作用效果与被絮凝物的表面性质密切相关。黏粒由于同晶替换作用其表面通常带负电荷,凭借静电引力吸引周围溶液中极性相反且电

荷相等的水化阳离子 (Na^{2+} 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等) 后形成双电层结构。APAM 为阴离子型高分子材料, 水解生成的活性负电基团 COO^- 与土颗粒表面的水化阳离子发生电荷中和反应, 双电层结构被压缩破坏, 黏粒与其表面吸附的极性水分子之间的化学作用力被严重削弱, 导致其从吸附态转变为游离态, 减小了黏粒表面的结合水膜厚度^[18, 24-25]。利用这一特点, 电渗法联合絮凝作用可以最大程度上排出高含水率淤泥质土中的自由水以及部分结合水。

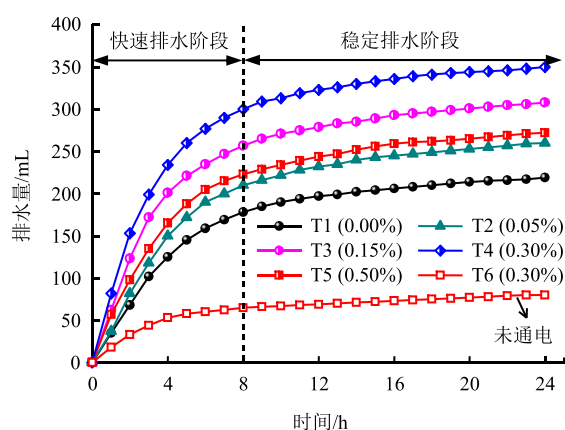


图 6 排水量变化曲线

Fig.6 Variation curves of drainage volume

絮凝剂掺量的选择在絮凝-电渗法联合治理淤泥质土过程中至关重要。本研究, 新型有机高分子材料 APAM 存在最优掺入比为 0.30%, 当其掺量超过这一临界值, 土体电渗排水速率降低。首先, “吸附架桥”作用的发挥主要依靠颗粒表面的空余“吸附面”^[26], 但其随着溶液浓度的增高而被逐渐覆盖, 过量添加的絮凝剂因缺少作用面无法链结黏粒絮凝成团, 进而在颗粒表面形成稳定的空间保护层。其次, 随着 APAM 浓度的增加, 聚合物水解生成的负电基团 COO^- 已经完全中和黏粒表面的水化阳离子, 多余的负电基团将与黏粒的负表面位点产生静电排斥, 致使絮凝剂与黏粒之间的电荷中和作用削弱^[18]。最终, 多余的高分子聚合物随机填充土体孔隙, 导致渗流通道稳定性和连通性减小, 从而使得电渗排水速率大幅降低^[20-21]。

3.2 电流强度与有效电阻

电场力是促进淤泥质土排水固结的主要动力来源, 而电场力大小受土体两端实际作用电压所控制, 且与土中电流强度值呈正比关系。由于电极与土体之间存在一定的接触电阻, 导致加载在土体两端的有效电势往往小于电源输出电压。本文试验中电势测针 E1 和 E5 距离阴阳电极均为 5 mm, 远小于电

渗土样的长度和截面尺寸, 因此, 可将二者的电势差值作为土体两端的有效电势^[27], 有效电势与电流强度比值即为有效电阻。

如图 7 所示, 土体电流强度呈现先短暂升高后持续下降的趋势, 有效电阻变化趋势恰好相反。以工况 T4 为例, 将电流强度变化趋势可划分为 3 个阶段: 升高阶段、快速衰减阶段、稳步衰减阶段。在 0~4 h 内电流强度升高是因为通电初始时刻土体中导电通路复杂繁多^[4, 28], 随着导电通路的稳定, 电流强度逐渐达到峰值 0.89 A。随后, 电流强度快速衰减, 当通电 16 h 时, 电流强度为 0.29 A, 降低幅度高达 67%, 这与通电排水过程中土体性状及其电极腐蚀程度密切相关。一方面, 由图 6 可知, 通电初始阶段淤泥质土的排水量大, 易发生失水收缩现象, 土体裂纹发育致使已有导电通路被阻隔, 增大了土体的有效电阻, 使得电流强度降低。另一方面, 在通电过程中, 土中水在高电压持续作用下发生电解反应会生成大量气体^[5], 迁移汇集在阴极附近的水分携带土颗粒呈水泡形状持续涌出后形成土体-电极脱空现象, 阴极与土体之间的接触面逐渐减小并延展至土样底部, 使得界面电阻大幅增大, 土体的电渗排水速率显著下降。通电后期, 电渗排水量已趋于稳定, 此时电流强度稳步衰减, 且主要由电极腐蚀所引起。

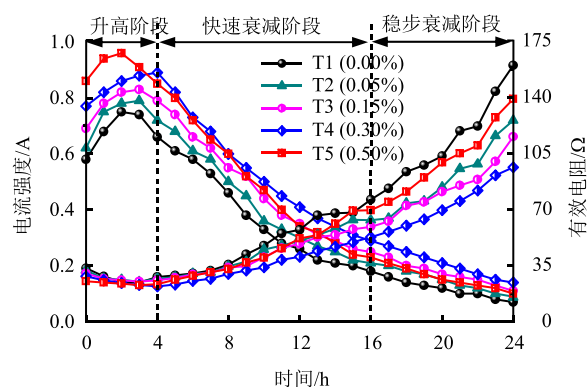


图 7 电流强度与有效电阻变化曲线

Fig.7 Variation curves of current intensity and effective resistance over time

絮凝剂 APAM 的掺入增加了土中导电离子浓度, 提高了土体的初始电流强度值。与 T1 工况相比, T2~T4 工况初始电流强度值随着掺量的增大而增大, 分别为 0.62、0.68、0.74、0.86 A。与此同时, 电流强度的初始衰减时刻也对应滞后。APAM 结构单元中具有 C=O 和 NH_2 , 与被絮凝物表面 OH 基团形成氢键^[18, 24-25], 自身高分子长链与带负电土颗粒“吸附架桥”互相连接, 增加了土颗粒之间的范德华

力和静电作用力,土体的整体性得到明显改善。联合工况下阳极附近土体开裂程度降低,使得电流强度衰减进程减缓。但当絮凝剂掺入比过高时,因初始电流强度值较大,使得阳极腐蚀程度提高,增加了土体中的界面电阻率,迫使电流强度的初始衰减时刻提前,且后期衰减幅度明显增大。综合考虑电流强度初始值和衰减幅度对排水量的影响规律,本试验研究中,当絮凝剂 APAM 掺量为 0.30% 时,电渗治理淤泥质土的优化效果最为明显。

3.3 电渗能耗

能耗是衡量絮凝-电渗法联合治理淤泥质土经济合理性的一个重要参考指标。由图 7 可知,各工况初始有效电阻值均较小,此时有利于土体排水固结,但通电后期有效电阻值持续增高,电能作用在土体中主要是以热量形式耗散。在稳压输出情况下,根据焦耳定律,计算电渗总能耗如下:

$$W = \int_0^t UI_t dt \quad (1)$$

式中: W 为电渗总能耗 ($W \cdot h$); U 为稳压直流电源输出电压,文中选择为 25 V; I_t 为 0~ t 时刻内随时间变化的瞬时电流 (A)。由图 8 可知,各工况电渗总能耗相差不大,且随着絮凝剂 APAM 掺入比的增加,因土体初始电流强度值提高,导致电渗总能耗也相应增大。但单一考虑电能总耗将忽略絮凝剂对电渗排水量的有利影响,因此,定义平均能耗系数 C ,通过计算各工况排出单位体积水分所耗费的电能来评判其优劣性^[16],公式如下所示:

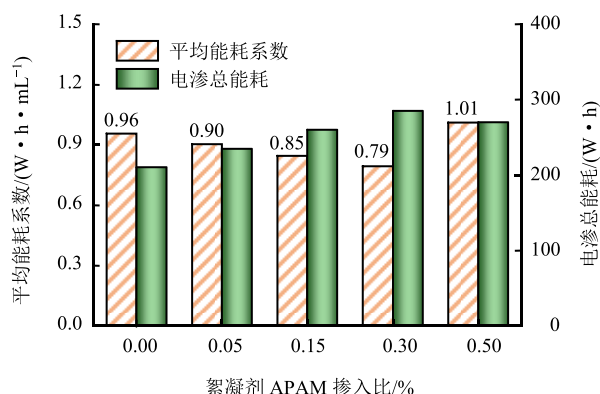


图 8 各工况的电渗总能耗与平均能耗系数

Fig.8 Total energy consumption and average energy consumption coefficient of electro-osmosis for each condition

$$C = \frac{W}{Q} = \frac{\int_0^t UI_t dt}{Q} \quad (2)$$

式中: Q 为电渗累计排水量 (mL); C 为平均能耗系数 ($W \cdot h \cdot mL^{-1}$)。5 组工况的平均能耗系数分别为 0.96、0.90、0.85、0.79、1.01 $W \cdot h \cdot mL^{-1}$,相较于传统的单一电渗排水法,掺入适量絮凝剂 APAM 显著提高了淤泥质土的排水量,电渗平均能耗系数逐渐降低。然而,当过量提高絮凝剂掺入比时,自身的电荷中和和“吸附架桥”作用受限,排水效果受到明显抑制。与此同时,因电解反应造成土体温度升高,起初分子缠绕形成的网状结构被破坏,高聚物黏度降低,高温使得阳极钢筋腐蚀速率加快^[5],综合导致工况 T5 平均能耗系数急剧增大。

3.4 含水率

絮凝-电渗法联合治理的主要目标就是最大程度降低淤泥质土的含水率以满足工程需求。通电结束后,沿电势测针所在的纵向断面等间隔分层取样,测试土样含水率平面分布如图 9(a)~9(e)所示。相比淤泥质土初始含水率 40%,在持续电场力作用下,通电 24 h 后土体含水率大幅下降。同时,电渗结束后土体含水率在空间上呈现一定的规律分布。首先,距离阳极越远,土体含水率越高,这与土体中水分定向渗流路径密切相关,且有效电势沿着土体长度方向逐渐减小,加之阴极铁板和土体脱空现象的影响,综合导致部分迁移至阴极附近的水分无法排出便汇集在此。其次,沿土样高度方向对含水率分布进行对比,发现土样底层含水率普遍略高于顶层含水率,可能是重力作用导致的水分下渗和电势降存在的缘故,与此同时,通电过程中电极产生的热量散失也会加速表层土体的水分蒸发^[12]。

为了更加直观地展示掺入有机絮凝剂 APAM 后土体含水率的分布规律,按照图 4 布置,在土体表层和中部测点取样测试含水率如图 9(f)~9(g)所示。观察发现,工况 T1~T5 各个测点土体含水率均值为 $T1 > T2 > T5 > T3 > T4$,这一分布与土体排水量变化规律恰好相符。证明通过掺入适量絮凝剂可以有效压缩土颗粒双电层结构,进而减少软黏土颗粒表面的结合水膜厚度,通过与电渗法联合提高土体的排水量,使得淤泥质土的最终含水率显著降低。

3.5 抗剪强度

抗剪强度是衡量絮凝-电渗法联合加固淤泥质土效果的又一重要参数。在低渗透性且高含水率的淤泥质土两端加载有效电压后,随着水分排出,土体内部将产生负孔隙水压力 u ^[2],可由下式给出:

$$u = \frac{k_e \gamma_w V}{k_h} \quad (3)$$

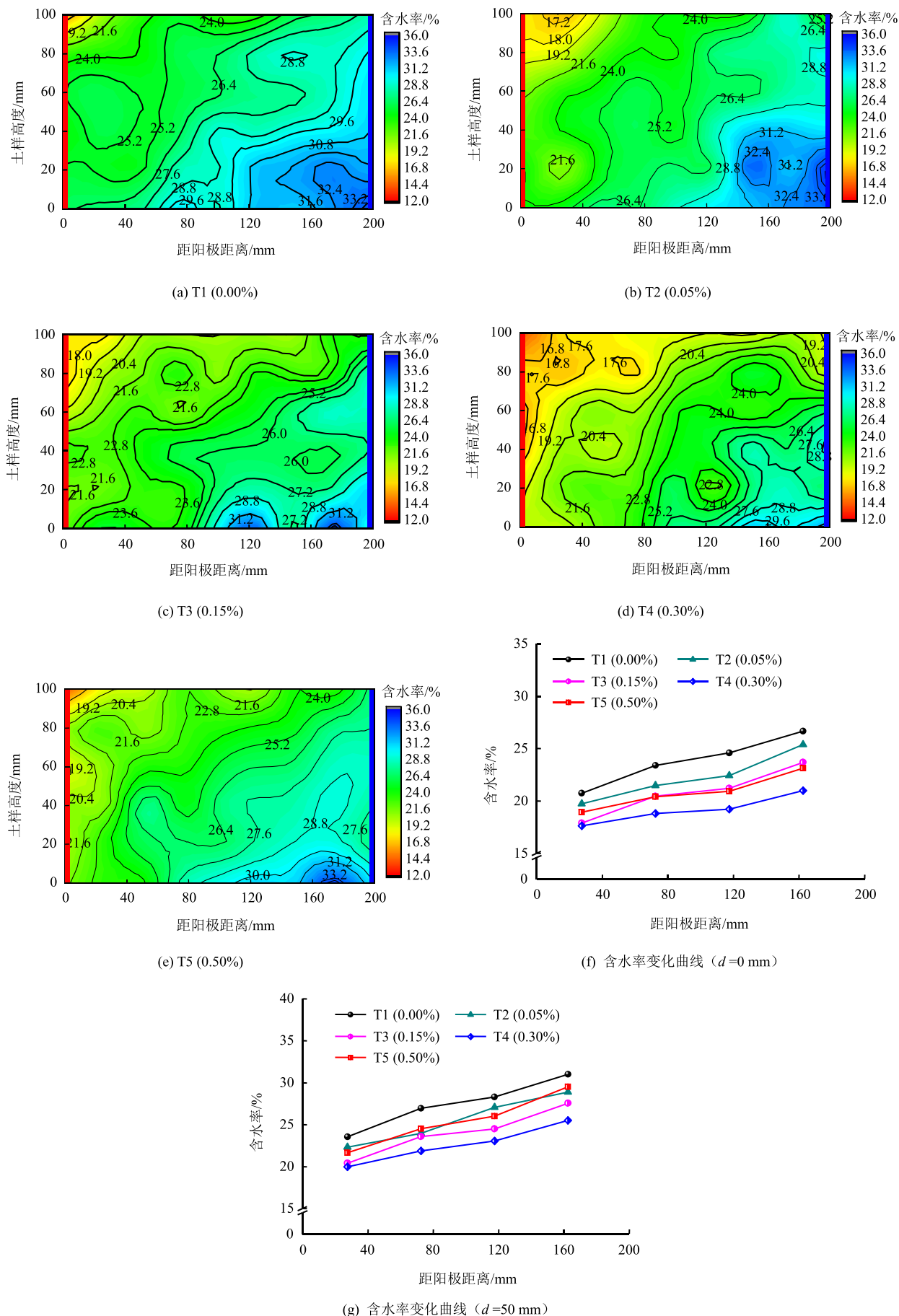
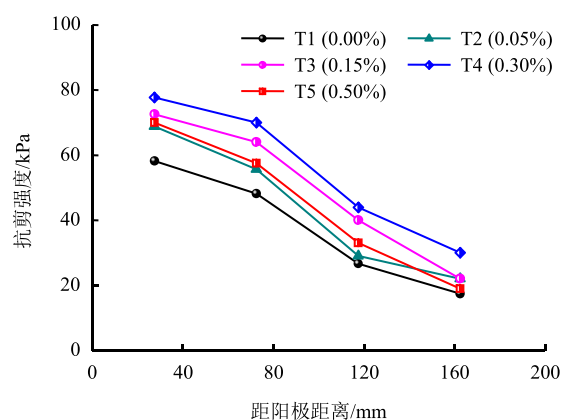


图 9 电渗结束后土体含水率分布

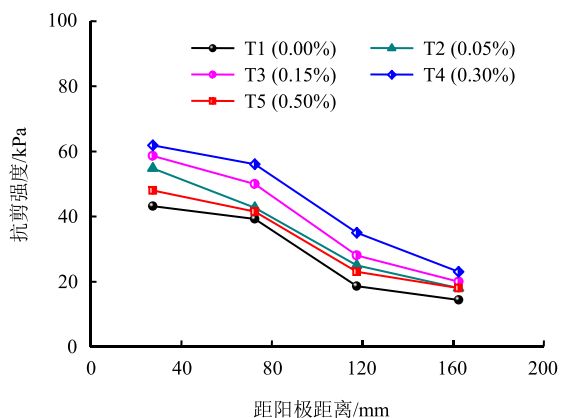
Fig.9 Distribution of moisture content of soil sample after electro-osmosis treatment

式中: k_e 为电渗透系数; γ_w 为水的重度; V 为加载电压; k_h 为水力渗透系数。根据有效应力原理, 饱和土的总应力 σ 由有效应力 σ' 和孔隙水压力 u 组成。在总应力 σ 不变的情况下, 负孔隙水压力 u 的产生使得有效应力 σ' 增大。理论上, 电渗排水固结后淤泥质土的承载性能将会得到明显改善, 而土体抗剪强度的提高幅度最终由实际排水量决定。

如图 10 所示, 电渗固结后土体抗剪强度大幅提升。在同一个电渗阶段中, 距离阳极越远, 土体的抗剪强度值越小, 一方面是因为在施加电压时, 沿电极方向存在电势降; 另一方面, 在电场力作用下大量水分自阳极定向迁移至阴极, 导致阳极表层土体形成干裂的硬土层, 而阳极发生电化学腐蚀生成的 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 胶体, 对阳极附近的土体也会进行充填加密^[6, 28]。除此之外, 同一阶段土体的抗剪强度沿着深度增加方向呈递减趋势, 这与前文中含水率的变化趋势颇为相似, 主要是因为界面电阻沿着土体深度方向逐步增加, 导致有效电势逐渐降低, 施加给下层土体中水分迁移的电场力相比于上层土体大幅削弱^[11]。



(a) $d=0$ mm



(b) $d=50$ mm

图 10 抗剪强度变化曲线

Fig.10 Variation curves of shear strength

从图 10 中还可看出, 工况 T2~T5 的抗剪强度值均大于 T1, 证明絮凝剂 APAM 的掺入对电渗排水固结淤泥质土起一定的促进作用。首先, 絮凝剂 APAM 改变了软黏土颗粒的持水特性, 使得电渗排水量增大。其次, 自身高分子长链的“吸附架桥”作用增加了土颗粒之间的黏结力, 将溶液中的细小粉黏粒等分散相快速凝聚后呈大絮团状下沉, 有效提高了土体抗剪强度^[24-25]。与此同时, APAM 分子结构中的亲水基团吸附在土体颗粒表面, 而其“疏水尾”向外背离土粒, 使得颗粒表面形成一层包裹膜, 有效降低了沉积絮团的水敏性。

3.6 土体性状与电极腐蚀

电渗试验过程中, 观察到阳极附近土体表面存在一些红褐色物质, 如图 11 所示。根据先前相关学者的研究^[16, 28], 推断是铁板电极的电化学腐蚀产物。这也是随着电渗试验的进行, 电渗效果逐渐降低的重要原因之一。首先, 通电时土中水电解发生氧化还原反应, 在阳极和阴极分别产生酸性 H^+ 和碱性 OH^- , 并伴随有离子迁移以达到溶液平衡^[5]。其次, 阳极电化学腐蚀主要以吸氧腐蚀为主, 生成的 Fe^{2+} 与阴极的 OH^- 结合生成 $\text{Fe}(\text{OH})_2$, 同时被空气中的 O_2 氧化生成 $\text{Fe}(\text{OH})_3$, 最终脱水生成铁锈 $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$, 如图 10 所示。具体化学反应方程式见式 (4) ~ (9)。

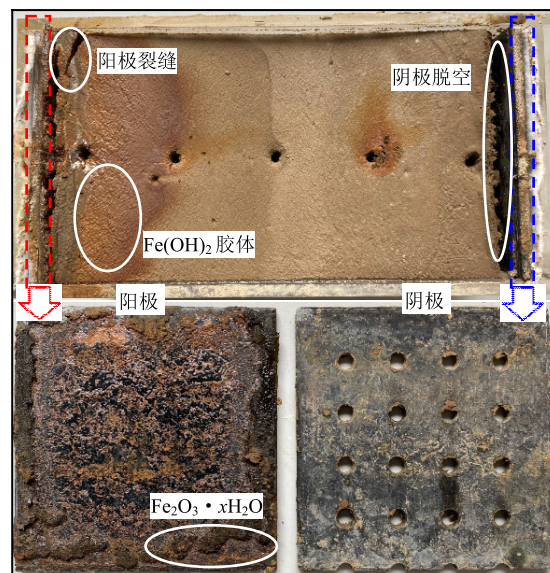
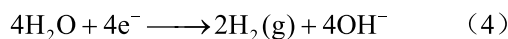


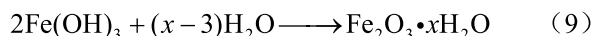
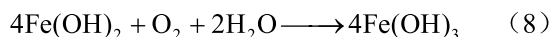
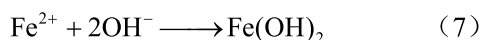
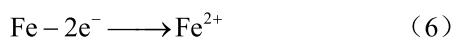
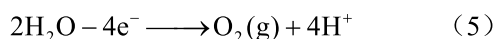
图 11 电渗结束后的土体性状与电极腐蚀

Fig.11 Soil properties and electrode corrosion after electro-osmosis

阴极:



阳极:



电渗试验结束后, 将电极依次取出称重测其腐蚀量如图 12 所示。可看到阳极腐蚀量随着絮凝剂 APAM 掺入比的增大而增大, 且与初始电流强度变化趋势正相关。本文试验中, 为方便比较不同絮凝剂掺入比对电渗排水固结效果的影响, 将各工况的通电时间均设置一致。如若将排水量设为定值来考虑通电时间以及附属能耗问题, 由图 6 可知, 絮凝剂适量掺入可大幅缩短土体定量排水的通电时长, 有效缓解持续高电压造成阳极腐蚀程度增加的问题。然而, 当絮凝剂掺入比过大时, 土体电渗排水效果受到抑制, 通电排水时间增加, 偏高的电流强度值使得阳极腐蚀速率加快, 增加了阳极腐蚀量与电渗总能耗。

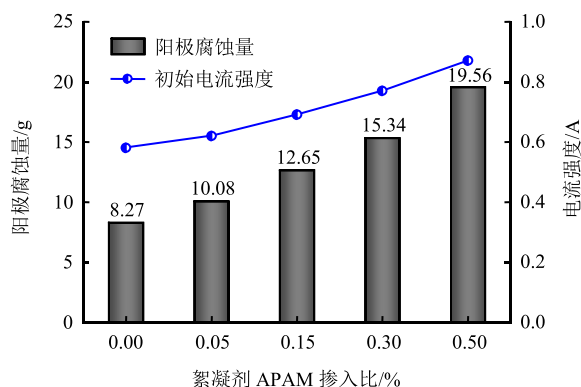


图 12 电渗结束后阳极腐蚀量

Fig.12 Anodic corrosion after electro-osmosis

电渗试验结束后, 土样的沉降变化曲线如图 13 所示。在电渗排水固结过程中, 土体沉降量与脱水程度呈正相关, 因此, 阳极附近土体理应存在最大沉降量。但本试验中观察到土样中间部位沉降幅度较大, 两端沉降量反而相对偏小, 推断此现象与两侧电极的界面效应^[29-30]以及黏粒运移现象相关。从图 11 中可看出, 阳极持续腐蚀生成的胶体物质加强了附近土体与电极之间的联结度, 从而限制了阳极侧土样的沉陷。与此同时, 电渗过程中细小的粉黏

粒会随着水分的迁移而积聚在阴极附近, 使得此处土体沉降量变小。但这种现象对电渗排水效果是极为不利的, 集聚在阴极附近的细小黏粒会形成致密的不透水“土柱”^[12-13], 严重时堵塞附近土体的排水通道, 降低电渗排水效果。因此, 为了显示絮凝-电渗联合治理后土体沉降的不均匀程度, 本文中采用方差的概念来定义土体不均匀沉降系数如下:

$$s^2 = \frac{1}{5} \left[\sum_{i=1}^5 (x_i - x)^2 \right] \quad (10)$$

式中: s^2 为不均匀沉降系数; x_i 为各测点沉降值; x 为各工况的沉降均值。如图 13 所示, 工况 T1~T5 的不均匀沉降系数分别为 11.04、9.44、7.44、5.69、7.88。由上述可得, 本试验中引入适量有机絮凝剂 APAM, 利用自身携带的极性基团吸附溶液中悬浮的黏粒后快速絮凝沉降, 电渗土体的均匀性明显改善。与此同时, 絮凝剂 APAM 存在最优掺入比为 0.3%, 当其添加量超过这一临界值后, 因缺少吸附面致使多余的胶体状聚合物填充土体孔隙, 抑制电渗排水速率, 导致土体的不均匀沉降系数增大。

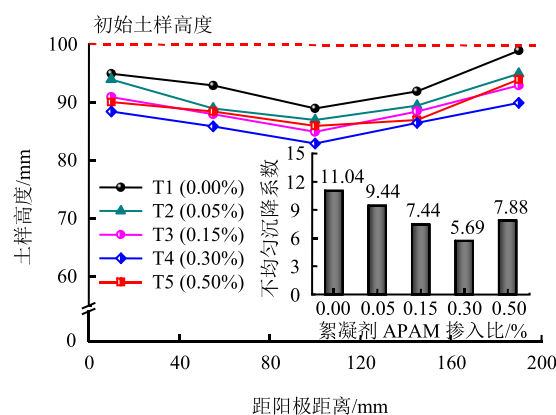


图 13 土样沉降变化曲线

Fig.13 Curves of surface settlement of soil sample

3.7 微观作用机制

通电结束后, 对不同絮凝剂 APAM 掺入比下的电渗土样进行扫描电镜试验, 本文选用放大 1 000 倍的电镜图像, 可清楚观察到土体的颗粒骨架和孔隙分布形态。由图 14(a)可见, 由于试验淤泥质土的含水率高, 在单一电渗固结过程中, 土颗粒表面吸附的部分弱结合水和自由水被快速排出, 原位置游离的细小粉黏粒随水分定向运移而发生流失, 导致土样支架孔隙发育, 颗粒间以点接触居多, 整体结构松散, 使得单一电渗固结土样整体抗剪强度较低, 且土体不均匀程度也更显著。

当在淤泥质土中加入已水解的絮凝剂 APAM 溶液后,其迅速向土粒固-液界面扩散,通过电荷中和作用减少土颗粒表面的结合水膜厚度,增加了电渗排水总量。同时,高分子长链通过接枝和交联缠绕等方式形成网状结构,利用吸附架桥作用捕捞溶液中的细小粉黏粒后形成较大直径的沉积絮团,

有效避免电渗过程中黏粒迁移而造成土体骨架松散及其阴极淤堵问题。从图 14(b)~14(e)可看出,在一定掺入比范围内,生成的絮状团聚体有效地随机填充土体孔隙,使得联合治理土样的孔隙率显著降低,颗粒间主要以面面接触和镶嵌接触形式为主,土体颗粒骨架密实,胶结程度普遍增强。

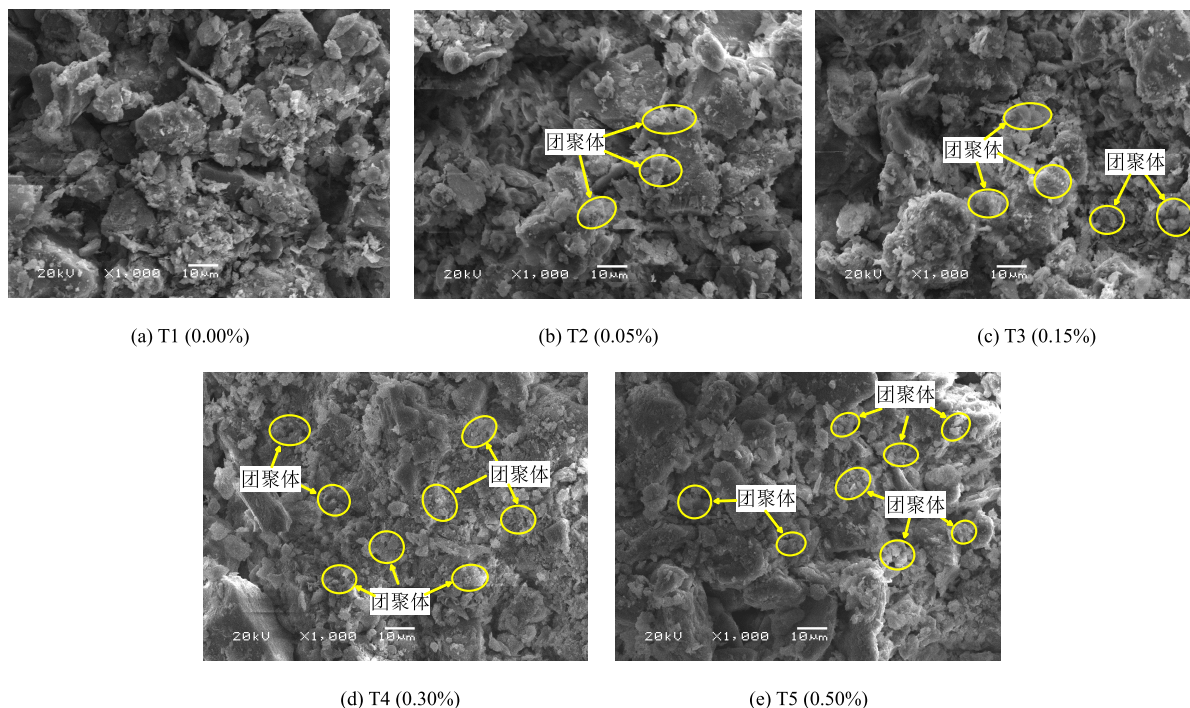


图 14 电渗结束后土样 SEM 图像
Fig.14 SEM images of the soil samples after electro-osmosis treatment

4 结 论

通过多组室内模型试验,发现絮凝-电渗法联合治理淤泥质土的排水固结效果较好。主要得出以下结论:

(1)相较于单一电渗法,添加有机絮凝剂 APAM 联合作用可减少黏粒表面的结合水膜厚度,显著提升淤泥质土的电渗排水速率和排水量。

(2)絮凝-电渗法联合作用提高了土体的初始电流强度,有效缩短了定量排水的通电时长,电渗总能耗和平均能耗系数降低。通电结束后,土样整体含水率大幅下降,抗剪强度提升效果显著。

(3)絮凝剂 APAM 的吸附架桥作用促使黏粒絮凝沉积,有效缓解了电渗过程中因细小土粒迁移集聚而造成的阴极排水堵塞问题。治理后土体的不均匀沉降系数降低,整体性增强。

(4)本试验中絮凝剂 APAM 存在最优掺入比为 0.3%。当絮凝剂掺入比过大时,平均能耗系数增加,

土体电渗排水效果减弱。本文初步探讨了絮凝-电渗法联合加固淤泥质土的作用机制,但实际发生的物化反应极其复杂,尚需进一步试验研究。

参 考 文 献

- [1] MITCHELL J K, SOGA K. Fundamentals of soil behaviour[M]. New York: Wiley, 1976.
- [2] GLENDINNING S, LAMONT-BLACK J, JONES C J F P, et al. Treatment of lagooned sewage sludge in situ using electrokinetic geosynthetics[J]. *Geosynthetics International*, 2008, 15(3): 192-204.
- [3] CASAGRANDE I L. Electro-osmosis in soils[J]. *Geotechnique*, 1949, 1(3): 159-177.
- [4] 刘飞禹, 汤家郗, 袁国辉, 等. 纤维加筋优化电渗法处理疏浚淤泥的试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2021, 40(12): 2545-2552.

LIU Fei-yu, TANG Jia-xi, YUAN Guo-hui, et al.

- Experimental study on treatment of dredged slurry by electro-osmosis with fiber reinforcement[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2021, 40(12): 2545-2552.
- [5] XUE Z J, TANG X W, YANG Q, et al. Comparison of Electro-osmosis experiments on marine sludge with different electrode materials[J]. **Drying Technology**, 2015, 33(8): 986-995.
- [6] 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, 40(9): 3493-3514.
- ZHANG Lei, WANG Ning-wei, JING Li-ping, et al. Comparative experiments of different electrode materials on electro-osmotic consolidation[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2019, 40(9): 3493-3514.
- [7] ZHUANG Y F. Large scale soft ground consolidation using electrokinetic geosynthetics[J]. **Geotextiles and Geomembranes**, 2021, 49(3): 757-770.
- [8] 李一雯, 周建, 龚晓南. 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. Experimental research on influence of electrode array on electroosmotic effect[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2013, 34(7): 1972-1978.
- [9] 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(2): 287-302.
- [10] FU H T, FANG Z Q, WANG J, et al. Experimental comparison of electroosmotic consolidation of Wenzhou dredged clay sediment using intermittent current and polarity reversal[J]. **Marine Georesources & Geotechnology**, 2018, 36(1): 131-138.
- [11] 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 electric-osmosis and low-energy dynamic compaction in soft ground reinforcement[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2015, 34(3): 612-620.
- [12] WANG J, MA J, LIU F, et al. Experimental study on the improvement of marine clay slurry by electroosmosis-vacuum preloading[J]. **Geotextiles and Geomembranes**, 2016, 44(4): 615-622.
- [13] 王柳江, 陈强强, 刘斯宏, 等. 水平排水板真空预压联合电渗处理软黏土模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(增刊 2): 3516-3525.
- WANG Liu-jiang, CHEN Qiang-qiang, LIU Si-hong, et al. Model test on treatment of soft clay under combined vacuum preloading with electro-osmosis using prefabricated horizontal drain[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2020, 39(Suppl. 2): 3516-3525.
- [14] MOAYEDI H, NAZIR R, KASSIM K A, et al. Measurement of the electrokinetic properties of peats treated with chemical solutions[J]. **Measurement**, 2014, 49: 289-295.
- [15] 袁国辉, 胡秀青, 刘飞禹, 等. 絮凝-逐级加压电渗法改良疏浚淤泥试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(增刊 1): 2995-3003.
- YUAN Guo-hui, HU Xiu-qing, LIU Fei-yu, et al. Experimental study on the improvement of dredged slurry by flocculation-step-by-step loading voltage electro-osmosis method[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2020, 39(Suppl. 1): 2995-3003.
- [16] 刘飞禹, 吴文清, 海钧, 等. 絮凝剂对电渗处理河道疏浚淤泥的影响[J]. 中国公路学报, 2020, 33(2): 56-63.
- LIU Fei-yu, WU Wen-qing, HAI Jun, et al. Effect of flocculants on electro-osmotic treatment of river dredged sludge[J]. **China Journal of Highway and Transport**, 2020, 32(2): 56-63.
- [17] HU J L, LI X B, ZHANG D K, et al. Experimental study on the effect of additives on drainage consolidation in vacuum preloading combined with electroosmosis[J]. **KSCE Journal of Civil Engineering**, 2020, 24(9): 2599-2609.
- [18] DWARIA R K, ANGADIA S I, TRIPATHY S K. Studies on flocculation characteristics of chromite's ore process tailing: effect of flocculants ionicity and molecular mass[J]. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, 2018, 537: 467-477.
- [19] 武亚军, 陆逸天, 骆嘉成, 等. 药剂真空预压法在工程废浆处理中的防淤堵作用[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(3): 525-533.

- WU Ya-jun, LU Yi-tian, LUO Jia-cheng, et al. Anti-clogging function of vacuum preloading with flocculants in solid-liquid separation of construction waste slurry[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2017, 39(3): 525-533.
- [20] WANG J, HUANG G, FU H T, et al. Vacuum preloading combined with multiple-flocculant treatment for dredged fill improvement[J]. **Engineering Geology**, 2019, 259: 105194.
- [21] LEI H Y, XU Y G, LI X, et al. Effect of polyacrylamide on improvement of dredger fill with vacuum preloading method[J]. **Journal of Materials in Civil Engineering**, 2019, 31(9): 04019193.
- [22] 户振. 电渗-絮凝-真空联合法加固滩涂软土地基的试验研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2021.
- HU Zhen. Experimental study on consolidation of soft soil foundation in tidal flat by electroosmosis-flocculation-vacuum combined method[D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2021.
- [23] 李瑛. 软黏土地基电渗固结实验和理论研究[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.
- [24] MPOFU P, ADDAI-MENSAH J, RALSTON J. Investigation of the effect of polymer structure type on flocculation, rheology and dewatering behaviour of kaolinite dispersions[J]. **International Journal of Mineral Processing**, 2003, 71(1-4): 247-268.
- [25] DASH M, DWARI R K, BISWAL S K, et al. Studies on the effect of flocculant adsorption on the dewatering of iron ore tailings[J]. **Chemical Engineering Journal**, 2011, 173(2): 318-325.
- [26] 蒲诃夫, 潘友富, KHOTEJA Dibangar, 等. 絮凝-水平真空两段式脱水法处理高含水率疏浚淤泥模型试验研究[J]. **岩土力学**, 2020, 41(5): 1502-1509.
- PU He-fu, PAN You-fu, KHOTEJA Dibangar, et al. Model test on dewatering of high-water-content dredged slurry by flocculation-horizontal vacuum two-staged method[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2020, 41(5): 1502-1509.
- [27] 王梁志, 齐昌广, 郑金辉, 等. 电渗复合地基模型试验研究[J]. **岩石力学与工程学报**, 2020, 39(12): 2557-2569.
- WANG Liang-zhi, QI Chang-guang, ZHENG Jin-hui, et al. Model test study on electroosmotic composite foundations[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2020, 39(12): 2557-2569.
- [28] 刘飞禹, 宓炜, 王军, 等. 逐级加载电压对电渗加固吹填土的影响[J]. **岩石力学与工程学报**, 2014, 33(12): 2582-2591.
- LIU Fei-yu, MI Wei, WANG Jun, et al. Influence of applying stepped voltage on electroosmotic reinforcement of dredger fill[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2014, 33(12): 2582-2591.
- [29] 任连伟, 曹辉, 孔纲强. 试剂注入配合比对化学电渗法处治软黏土加固效应对比研究[J]. **岩土力学**, 2020, 41(4): 1219-1226.
- REN Lian-wei, CAO Hui, KONG Gang-qiang. Treatment effect of reagent injection mixing ratio on soft clay improved by chemical electroosmosis method[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2020, 41(4): 1219-1226.
- [30] 任连伟, 曹辉, 孔纲强. 注入位置对化学电渗法加固软黏土效果影响试验研究[J]. **岩土力学**, 2021, 42(10): 2705-2713.
- REN Lian-wei, CAO Hui, KONG Gang-qiang. Experimental study on the effect of injection position on soft clay reinforcement by chemical electroosmosis[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2021, 42(10): 2705-2713.