

不同注浆位置对电化学加固黄土影响研究

杨凯翔 李伟 王宁伟 张曙

沈阳建筑大学土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168

[摘要]通过对甘肃地区黄土进行电化学固结试验,探究同一酸性调节液在不同注浆位置条件下对黄土的电化学加固影响,并对其加固机理进行分析。文中以重塑黄土土样为研究对象,采用金属电极,进行电化学加固法试验,通过对加固过程中的电流、排水量、能量消耗的变化及电化学加固前后土体含水率和土体承载力分析,得出以下结论:电化学加固法可以有效促进黄土水分的排出,同时对土体强度提升较大;与普通电渗法相比,加入酸性调节液可以大幅提升电流强度,试验后生成了更多的胶凝物质,使黄土强度大幅提升;在距离阴极 3.75cm 处注入酸性调节液使非饱和黄土的排水效果最好,土体最终承载力最高。

[关键词] 电化学加固技术; 非饱和黄土; 注浆; 含水率

DOI: 10.33142/ec.v5i9.6799

中图分类号: TU447

文献标识码: A

Study on the Influence of Different Grouting Positions on Electrochemical Reinforcement of Loess

YANG Kaixiang, LI Wei, WANG Ningwei, ZHANG Shu

School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, Liaoning, 110168, China

Abstract: Through the electrochemical consolidation test of loess in Gansu Province, the influence of the same acid regulating fluid on the electrochemical reinforcement of loess under different grouting positions is explored, and its reinforcement mechanism is analyzed. In this paper, the remolded loess soil sample is taken as the research object, and the electrochemical reinforcement method test is carried out with metal electrodes. Through the analysis of the changes of current, drainage and energy consumption in the reinforcement process, as well as the soil moisture content and soil bearing capacity before and after electrochemical reinforcement, the following conclusions are drawn: The electrochemical reinforcement method can effectively promote the drainage of loess moisture, and greatly improve the soil strength; Compared with ordinary electroosmosis method, adding acid regulating liquid can greatly increase the current intensity, and more cementitious substances are generated after the test, which greatly improves the strength of loess; The drainage effect of unsaturated loess is the best and the ultimate bearing capacity of soil is the highest by injecting acid regulating liquid at the distance of 3.75cm from the cathode.

Keywords: electrochemical reinforcement technology; unsaturated loess; grouting; moisture content

引言

黄土是一种在干燥气候条件下形成的区域性土类,在我国的西北地区和华北地区分布广泛。在目前的黄土分布中,湿陷性非饱和黄土的面积约占黄土总面积的 60%,由于其增湿变形的特性,导致相关地区的构筑物发生工程事故的情况层出不穷^[1]。随着我国“西部大开发”战略和“一带一路”战略的推动,西部工程建设愈发重要,黄土结构的稳定性对保证生活在黄土地区群众的安全问题有着重大意义。非饱和黄土对水有着特殊的敏感性,同时具有大孔隙,弱胶结的典型特征,其强度与当地工程建设以及滑坡的防治有着密切相关,因此提高非饱和黄土的强度显得尤为重要^[2-3]。到目前为止,在非饱和黄土的湿陷性发生机理^[4],以及湿陷性地基的处理技术^[5]等方面都有了突破。

为解决非饱和黄土遇水湿陷和强度降低的问题,笔者提出通过电化学加固法来降低黄土含水率,从而达到提高黄土强度的效果。电化学加固法较普通的加固黄土的方法有着安全性高、对环境污染小、施工机具可以循环使用等

优点,这种方法可以在对结构土体扰动最小的条件下,对非饱和黄土进行有效的加固。在 1948 年美国 Preece EF 教授等人已经开始研究电化学加固法;我国的汪闻韶教授(1953 年)和曾国熙教授^[6](1956 年)亦对电化学加固法进行了研究;王宁伟教授等^[7]通过对非饱和黄土做了电动排水固结与电动化学加固对比试验研究,发现电动化学加固法相较于电动排水固结方法,其提升非饱和黄土的排水效率和加固效果较明显。任连伟等^[8]通过在土体的阳极及中间的不同位置注浆,研究结果后得出在阳极和中间同时注入化学试剂,化学电渗排水和加固效果相对较好。

注浆位置的选择是否会影响电化学加固法对非饱和黄土的排水效率和加固效果,不同注浆位置对非饱和黄土的排水机理有何影响,是本文拟解决和讨论的问题。本试验以重塑黄土为研究对象,结合前人研究经验设计了四组试验,通过室内试验的方法,通过分析试验过程中的排水量、电流、能耗及加固前后土体含水率和土体强度的变化规律,来探讨浆液注入位置对试验的影响情况。

1 试验方案设计

1.1 试验土样的制备与性质

本试验土样取自甘肃地区，取土深度为 5.0m 左右，土样表面呈黄褐色，质地均匀，其物理性质见表 1。在取出土样 24h 内密封并及时送至实验室，试验所用土样为重塑黄土，故试验前将土样中明显的石子等杂质剔除，待土样晒干后碾碎过筛备用，以此来保证土样质地均匀，经过计算后按照比例制成重塑黄土，在常温环境下静置 48h 后得到重塑土样，部分水分会在土体表面聚集，要将其抽出，并从中取部分土样检测重塑土样的初始含水率。

表 1 试验土样物理力学指标

土样名称	土粒比重 G_s	干密度 $\rho_d / (g/cm^3)$	孔隙比 e	含水率 $\omega / \%$	饱和度 $S_r / \%$
黄土样	2.72	1.47	0.86	24.9	78.8

1.2 试验设备与装置

本试验所使用的电源装置为专门定制，可持续通电较长时间，并可以稳定输出电压与直流电流的电源装置，该电源装置由开关、旋钮及液晶显示盘组成，直流电流可用范围为 0~20A，直流电压可用范围为 0~70V，并带有漏电保护措施系统，在整个试验中电压恒定为 30V。所用四组土样模型箱均为塑料材质，由自行研制，内部尺寸为 240mm×180mm×160mm（长×宽×高），在阴极下方有排水口，将量筒放置在排水口下，便于收集排出的水。试验所用的电极均为直径为 23mm 的金属铁电极，电极长度为 200mm，试验前需要将电极插入土体部分进行入水浸湿，以便于有更好的导电效果。注浆管采用塑料材质的 PVC 注浆管，选用注浆管长度为 230mm，内、外径尺寸分别为 15mm 和 20mm，在三根注浆管上自上而下均匀的开直径相同的孔洞，并在洞口处包裹纱布，以此来防止黄土堵塞洞口导致浆液无法与土体发生反应，分别按要求插入三组试验的不同位置中，并用绝缘胶带将底部进行密封，防止注浆液流出。试验所用导线为多股铜芯电导线，满足试验安全的要求，导线与金属电极的连接部分用绝缘胶带包裹住，起到防漏电的效果。测量部分由量筒、电流表、微型贯入仪、烘干箱、电子秤组成。试验土体排出水分由排水口下方量筒读取；试验选用的微型贯入仪型号为 PS-MPT-A，用于测量电化学法加固后土样多个部位的土体强度，以此来得到实验数据并由此分析加固效果；选用量程为 0-15A，精度为 0.1A 的实验室专用电流表，便于精确读取瞬时电流；选用型号为 CJ-87 的烘干箱和电子秤，以此来测量烘干前后土体的质量，为测量土体含水率提供帮助。

1.3 试验方案

本试验在前人试验的基础上，配置 10%-13% 的醋酸溶液作为酸性调节液，分别在三组土样的不同位置注入，根据试验数据来分析注浆位置对于黄土的排水效率和加固效果的影响。其中四组试验土体均取自同一模拟箱内，初始含水率大致相同，约为 24.9%，本试验施加 30V 电压，

电极间距设置为 15cm。四组试验分别为：试验 A 为在紧贴阴极处注浆，并假设距离阴极距离为 0cm；试验 B 为在距离阴极 3.75cm 处注浆；试验 C 为在距离阴极 7.5 厘米处注浆；试验 D 为对照组，不注入酸性调节液，试验装置如图 1 所示。试验设备按要求组装后，接通直流电源，开始试验，在排水量明显变缓后向 A、B、C 三组试验的注浆管注入 50ml 配比为 10%-13% 的酸性调节液，试验基本参数如表 2。试验开始通电后，每过 1h 记录一次实验数据，包括瞬时电流、累计排水量，在连续通电 20h 后，停止试验。实验结束后，取出土样，用试验设备测量与试验前相同位置测量点处的土体强度，并用烘干法对这些测点土样进行含水率测试。对数据进行记录分析，探索电化学加固法的效果，同时分析其最佳注浆位置。

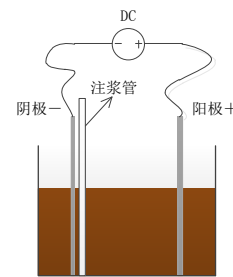


图 1 实验装置图

表 2 试验参数

参数	试验 A	试验 B	试验 B	试验 D
电压/V	30	30	30	30
电极距/cm	15	15	15	15
通电时间/h	20	20	20	20
注浆位置(距离阴极/cm)	0	3.75	7.5	无

2 试验结果与分析

下面对四组试验的结果从电流、累计排水量、能量功耗、含水率、土体承载力几个方面进行分析，分析结果如下：

2.1 累计排水量

土体在电化学加固期间的累计排水量变化如图 2，通电至第三小时排水明显减缓，开始注入酸性调节液。试验初期，四组试样累计排水量近似重合，随后在酸性调节剂作用下，累计排水量曲线出现差异，A、B、C 三组排水量明显大于对照组。随着试验的进行，四组试样累计排水量曲线逐渐趋于平稳，在试验结束后，四组试验的累计排水量分别为 265ml、290ml、250ml、89ml，即累计排水量由大到小为试验 B、试验 A、试验 C、试验 D。考虑到注入酸性调节液中含有部分水分，故相较于对照组，试验组累计排水量提升了 142%、170%、125%。

试验组相对于对照组排水量有较大提升，主要是由于酸性调节液的注入中和了阴极附近非饱和黄土的 pH 值，将碱性土质中和为中性土质，延缓了碱性离子沉淀生成的阻塞物的时间，拓宽了离子通道，有效的延长了排水时间。

排水量最少的是距离阴极 7.5cm 注浆的试验,其主要原因是注浆位置相对较远,反应大多发生在中间区域,黄土粘度大,排水通道相对不流畅,导致部分水分堆积未被排出。而在阴极区域注浆,由于其注浆位置相对较近,酸性调节液未与土体充分反应便随阴极排水口排出,后续反应效果不明显导致其排水量较少。试验后期,排水量曲线逐渐变缓并趋于平稳,这是由于随着土体中水分减少,土体逐渐被加固密实,排水通道被堵塞导致。

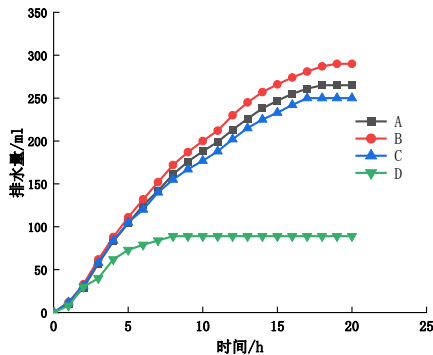


图2 累计排水量-时间曲线

2.2 电流

电流的大小可以反映试验是否顺利,试验过程中,用电流表对 A、B、C、D 四组进行检测,电流变化如图 3, A、B、C、D 四个土样的初始电流均为 0.4A, 其中 A、B、C 三组电流在试验开始有上升趋势, A 组最大电流为 0.55A, B 组最大电流为 0.57A, C 组最大电流为 0.45A。随着土体的加固,各实验组试样电流逐渐减弱。在整个试验过程中, B 组试验的电流大于 A、C、D 三组试验的电流。

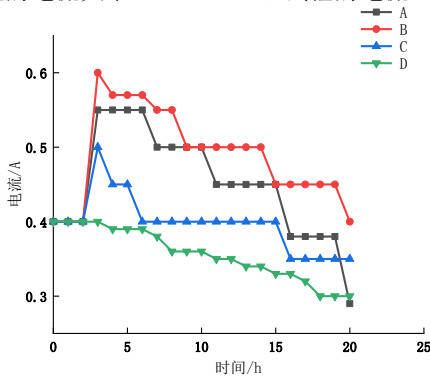


图3 电流-时间曲线

在电化学加固初期,酸性调节液的注入,增大了土体中导电离子的数目,导致了试验电流的增大。随着试验的进行,土体性质发生改变,导电路径受阻,从而导致电流强度相应减小,土体电流衰减的原因在很大程度上与土体界面电阻的增大有关。从注浆位置来看, B 组试验的电流在整个过程中要大于 A、C、D 三组试验的电流,其主要原因为试验 A 注浆位置距离阴极太近,未能充分反应即随阴极排水口排出,试验 C 注浆位置距离阴极太远,未能充分

发挥与阴极碱性条件中和的作用,导致两组试验电流提升不如试验 B,说明此组试验在拓宽离子通道方面效果较好,即在距离阴极 3.75cm 注入酸性调节液效果最好。

2.3 累计能耗

试验稳压输出电压为 30V, 根据电流实验数据, 电化学习能消耗表达式为:

$$C_{t_2} = C_{t_1} + \int_{t_1}^{t_2} UI dt \quad (1)$$

式中: C_{t_1} 、 C_{t_2} 为 t_1 时刻和 t_2 时刻的能耗, U 和 I 分别为电源的输出电压 (V) 和 $t_1 - t_2$ 时刻某时刻 t 的电流 (A)。

试验的能耗曲线如图 4 所示。由图 4 可以看出, 试验 B 能耗最高, 为 295.8 w·h, 试验 A 能耗值略低于试验 B, 为 271.8 w·h, 试验 C 能耗值最低, 为 238.5 w·h。三组试验能耗均高于试验 D 的能耗值 212.7 w·h, 其主要原因为酸性调节液的注入, 为土体提供了更多的离子, 导致试验电流增大, 在通电时间相同的条件下, 试验过程中电流越大, 试验过程消耗能耗越大。根据试验数据分析, 四组土样在最后几小时能耗仍在不断提升, 但排水量没有增加, 说明最后几小时的能耗利用并不明显, 故在实际工程中, 要及时意识到这一点, 避免不必要的能耗浪费。

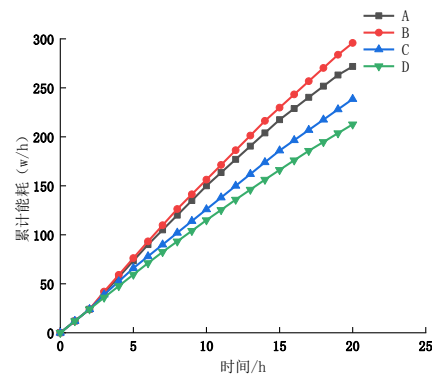


图4 能耗-时间曲线

2.4 含水率

试验所用土样为重塑土样, 其初始含水率均为 24.9%, 试验结束后, 分别在距离阴极 1cm、3cm、5cm、7cm、9cm、11cm、13cm 处取样, 对四组方案中的 7 组取样进行烘干处理后, 计算其含水率, 并绘制得到距离-含水率曲线图如图 5。

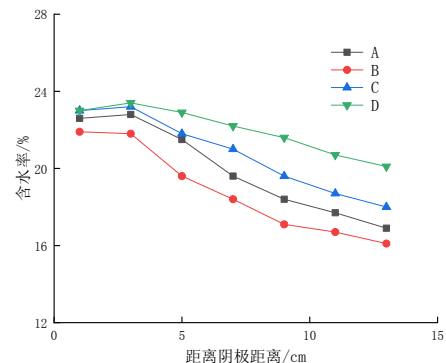
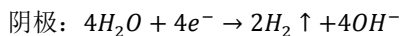
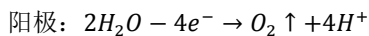


图5 含水率-时间曲线

由图 5 可以看出,四组试验含水率从阳极到阴极呈逐渐上升趋势,这是由于土体中的阳离子极易与水分子结合形成水化阳离子,在电场的作用下,发生定向移动至阴极排出,同时黄土粘性较大,试验后期部分水分无法排出,积累在阴极,故阴极含水率较大。

由图 5 可以看出, A 组试验阴极区域、中间区域、阳极区域试验后含水率分别为 22.7%、19.8%、17.3%,较试验开始前含水率分别下降 2.2%、5.1%、7.6%; B 组试验阴极区域、中间区域、阳极区域试验后含水率分别为 21.9%、18.4%、16.4%,较试验开始前含水率分别下降 3.1%、6.5%、8.5%; C 组试验阴极区域、中间区域、阳极区域试验后含水率分别为 23.1%、20.8%、18.4%,较试验开始前含水率分别下降 1.8%、4.1%、6.6%; D 组试验阴极区域、中间区域、阳极区域含水率分别为 23.2%、22.2%、20.4%,较试验开始前含水率分别下降 1.7%、2.7%、4.5%。综合来看, B 组试验含水率下降最高。

影响含水率的最主要因素为排水量,随着土体水分的排出含水率不断下降,其次,在试验过程中的电解水反应也会对土体的含水率产生一定影响,相关化学方程式如下,同时电流也会升高土体的温度,对水分蒸发有一定的影响。



由于 B 组实验为在距离阴极 3.75cm 处注入酸性调节液,电化学加固过程中排出水分较多,故其含水率下降较明显,加固效果也最为明显。

2.5 土体强度

试验所用土样为重塑土样,经过采点测量初始强度约为 59kpa,在静置 7 天后,分别在四组土样的阳极区域、阴极区域、中间区域的相同位置及深度,用微型贯入仪测量加固后土体的平均强度,结果如图 6。

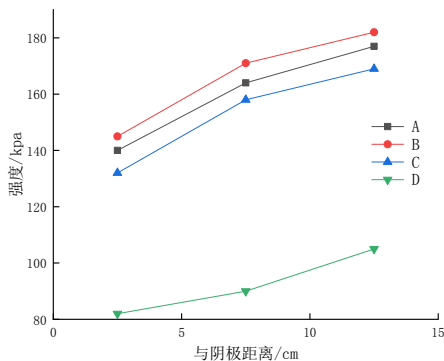
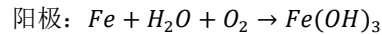


图 6 土样平均强度曲线

从图 6 中可以看出,土体强度曲线与排水量曲线变化规律基本对应。四组试验组均为阴极区域土体强度最低,中间区域次之,阳极区域最高,其主要原因如下:随着电化学加固的进行,阳极区域水分不断被排到阴极区域,导致阴极区域含水率始终大于阳极区域含水率,土体强度受

到影响,且阳极区域的铁电极不断发生电解作用,致使铁电极发生腐蚀并产生氢氧化铁胶体,该胶体使阳极区域土体孔隙填充密实,提高了土体强度。



从图 6 中可以看出,试验 A 加固后阳极区域、中间区域、阴极区域土体平均强度为 177 kPa、164 kPa、140 kPa,分别提升 118 kPa、105 kPa、81 kPa; 试验 B 加固后阳极区域、中间区域、阴极区域土体平均强度为 182 kPa、171 kPa、145 kPa,分别提升 123 kPa、112 kPa、86 kPa; 试验 C 加固后阳极区域、中间区域、阴极区域土体平均强度为 169 kPa、158 kPa、132 kPa,分别提升 110 kPa、99 kPa、73 kPa; 试验 D 加固后阳极区域、中间区域、阴极区域土体平均强度为 105 kPa、90 kPa、82 kPa,分别提升 46 kPa、31 kPa、23kPa。影响试验效果不同的主要原因为:在阴极附近加入酸性调节液后,其发挥了中和非饱和和黄土的 pH 值的作用,将碱性土质调为中性土质,延缓了阴极区域碱性离子沉淀生成阻塞物的时间,拓宽了排水通道,有效的延长了排水时间,从而提升了土体强度。同时,随着电化学加固的进行,土体中的部分金属离子生成胶体,也一定程度的填充密实了土体孔隙,提高了土体强度。分析上述试验数据,可以得出在距离阴极 3.75cm 处注入调节液更利于提升非饱和黄土的土体强度。

3 结论

本文从不同注浆位置入手,通过四组电化学加固室内试验,从电流、排水量、能量消耗的变化及电化学加固前后土体含水率和土体承载力分析,得出以下结论:

(1) 电化学加固过程中,与不注入酸性调节液相比,注入酸性调节液后,黄土排水时间、含水率、土体强度的提升均有较好效果,这是由于注入调节液后,通过改变非饱和和黄土的 pH 值,延缓了碱性离子沉淀生成的阻塞物,对排水通道起到了一定的扩充作用,从而有效延长了排水时间及排水量,达到提升土体强度的目的。

(2) 在电化学加固过程中,阳极区域含水率、土体强度提升效果均优于阴极区域,这是由于以下原因造成的:土体中的阳离子极易与水分子结合形成水化阳离子,在电场的作用下,发生定向移动至阴极排出,同时黄土粘度大,试验后期部分水分无法及时排出,积累在阴极区域。

(3) 对比三组不同注浆位置试验,从各方面综合分析,试验 B 即在距离阴极 3.75cm 处注入酸性调节液加固效果最明显,对土体强度提升最大。主要原因为:在阴极处注入酸性调节液,其未能发生充分反应即随阴极排水口排出,而在距离阴极 7.5cm 处注入酸性调节液,其注浆位置距离阴极太远,未能充分发挥其中和作用,同时中间区域水分也不能及时排出。而在距离阴极 3.75cm 处注入酸性调节液充分中和了阴极区域 pH 值,拓宽了排水通道,有效延长了排水时间。

[参考文献]

- [1]徐张建,林在贯.中国黄土与黄土滑坡[J].岩石力学与工程学报,2007,26(7):1297-1312.
- [2]常在君,张吾渝,马艳霞.青海地区非饱和黄土强度特性试验研究[J].铁道建筑,2015(4):117-121.
- [3]张炜.非饱和黄土的结构强度特性[J].水文地质工程地质,1990(4):22-25.
- [4]周凤玺,周志雄.非饱和黄土的增湿湿陷变形特性分析[J].岩土工程学报,2021,43(1):36-40.
- [5]邵生俊,于清高,王婷,等.深厚湿陷性黄土地基综合整治新技术研究[J].土木工程学报,2007,40(12):77-82.
- [6]曾国熙,高有潮.软粘土的电化学加固(初步试验结果)[J].浙江大学学报(工学版),1956(2):12-33.
- [7]王宁伟,鲍万强,梁展华.非饱和黄土电动化学注浆试验研究[J].城市建设理论研究,2020(28):53-54.
- [8]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):2705-2712.

作者简介:杨凯翔(1996-),男,汉族,山东潍坊人,硕士在读,沈阳建筑大学,研究方向:地基处理。