

电渗前后淤泥质土的物理力学性质对比研究

田震¹, 王宝军^{1*}, 卢毅², 李飞¹, 马楠洁¹

1. 南京大学地球科学与工程学院, 南京 210023;

2. 江苏省地质调查研究院, 南京 210018

摘要: 为深入研究电渗排水对土体工程性质的影响, 采用铁丝为电极, 在模型箱内对南京市某河道淤泥质土进行电渗排水模拟试验。电渗前后土的物理力学性质对比分析表明: 电渗后土体的液、塑限与塑性指数均降低; 电渗前后土体在相同含水量和干密度情况下进行直接剪切试验, 发现电渗后土体的凝聚力和内摩擦角均降低, 即电渗后土体在特定情况下出现了强度衰减的现象。论文基于土中阳离子流失机理对土体在特定情况下的强度衰减现象进行了微观解释。另外, 利用提出的新的电渗机理从微观角度解释了电渗过程中土体开裂现象, 阳极因快速失水, 最早出现裂隙, 但裂隙延展范围较小; 阴极含水量始终高于阳极, 且失水速度较慢, 裂隙延展范围较大。值得一提的是, 在以往的研究中并未关注到电渗加固过程中土中阳离子流失对电渗后土体性质的影响。

关键词: 淤泥质土; 电渗; 对比研究; 机理; 强度衰减; 土体开裂

中图分类号: P642

文献标识码: A

文章编号: 1006-7493 (2018) 03-0460-07

Comparative Experiment on Physical and Mechanical Properties of Muddy Soil before and after Electro-osmosis

TIAN Zhen¹, WANG Baojun^{1*}, LU Yi², LI Fei¹, MA Nanji¹

1. School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, China;

2. Geological Survey of Jiangsu Province, Nanjing 210018, China

Abstract: In order to study the effect of electro-osmotic drainage on soil properties, electro-osmotic consolidation of the muddy soil in a river channel in Nanjing was studied in laboratory by using wire electrode in a model. Before and after electro-osmosis, the muddy soil was analyzed and compared through physical and mechanical properties. The results demonstrated that liquid limit, plastic limit and the plastic limit index decreased after electro-osmosis. Before and after the electro-osmosis, the soil was used for direct shear test under the same water content and dry density. It's found that the cohesion and internal friction angle of the soil reduce under specific conditions, that is, electro-osmosis leads to strength attenuation. In this paper, the mechanism of soil strength attenuation is explained based on cation loss in soil during electro-osmosis. In addition, this paper proposed a new electro-osmotic mechanism to explain the phenomenon of soil cracking in the process of electro-osmosis from the microscopic point of view. The anode had the earliest fracture due to rapid dehydration, but the extension range of fracture was smaller. The water content of cathode was always higher than that of the anode and cathode had the slower water loss. So, the cathode had a large range of crack extension. It is worth mentioning that, the influence of the cation loss on the properties of the soil has not been noticed in the past study.

Key words: muddy soil; electro-osmosis; comparative study; mechanism; strength attenuation; soil cracking

Corresponding author: WANG Baojun, Professor; E-mail: baojun@nju.edu.cn

收稿日期: 2017-08-06; 修回日期: 2017-09-13

基金项目: 国土资源部公益性行业专项 (201511055)

作者简介: 田震, 女, 1993年生, 硕士研究生, 地质工程专业; E-mail: mf1629025@smail.nju.edu.cn

*通讯作者: 王宝军, 男, 1973年生, 教授; E-mail: baojun@nju.edu.cn

1 引言

随着国民经济的发展,中国土地资源由于不断扩大的居住用地范围和沿海城市的发展扩张而变得日益紧张,那么对高含水率、低承载力的软土的开发利用成了一项重要的工程举措。对于滨海和沼泽等软土地区,吹填造陆技术(Hoeksema, 2007; Yang, 2003)是一种常用的处理方式,而该类工程成功的关键是对产生的吹填淤泥的高效处理。电渗法由于其在加固软土方面相对于传统加固法(真空预压法、堆载预压法等)具有效率高、工期短和噪音小等优点,从而备受关注。1809年,俄国学者列依斯在潮湿的黏土中通电发现了电动现象(汪闻韶, 1999)。20世纪30年代德国学者Casagrande(1952)首次把电渗排水法应用于铁路边坡中并且取得了很好的加固效果。其后各国学者也对电渗法进行了大量的研究但由于电极腐蚀、加固土体不均匀性、能耗高等问题限制了其在实际工程中的广泛应用(陶燕丽, 2015)。特别是由于土体的电渗问题是多种因素相互作用、多场(电场、渗流场、浓度场)相互耦合的极端非线性问题(庄艳峰等, 2005),以及和无黏性土比较黏性土具有更加复杂的物理力学性质,从而导致对电渗机理的理解受到限制(Shang and Loky, 1997),因此对于电渗中出现的很多现象不能做出很好的解释,如加固后期土体开裂的问题和电渗后土体出现强度衰减的现象等。

不论是在工程实践中还是在室内试验研究中大家都越来越多的发现了电渗加固后期土体出现开裂的现象,如符洪涛等(2015)的室内试验中出现了很明显的裂缝;Glendinning等(2007)的电渗现场试验中也出现了裂缝等。电渗过程中土体开裂造成了电阻增大、阳极电势损失,不但会使电渗能量消耗增大而且加固效果也会减弱。很多学者对土体开裂这一问题的原因进行了研究并提出了一些改善措施。李苗等(2007)认为固结沉降差使土体受到拉力作用,最终导致土体开裂。李瑛等(2009)认为阳极附近土体的含水量低导致了阳极最先开裂。李瑛和龚晓南(2012)认为阴极反应生成的气体造成了阴极的裂缝增多。

本文通过对电渗排水前后淤泥质土的物理力学性质的对比研究发现电渗后土体在特定条件下

出现了强度衰减的现象。该发现在已有文献中未见报道。论文基于土中阳离子在电渗条件下的流失机理,对特定情况下土体强度衰减机理进行了微观解释。此外,利用提出的新的电渗机理也可以从微观角度解释电渗后期土体的开裂现象。期待不断完善的理论机制可以使电渗技术更为广泛的应用于工程实践。

2 实验方案

2.1 实验设计

先进行电渗排水实验再取电渗前后土体进行物理力学性质对比研究,其中需测的性质指标包含液塑限与抗剪强度。在直接剪切实验中,土样制备为同含水量和同干密度进行对比研究,电渗前后土样干密度均为 $1.3\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,电渗前含水率为29.2%,电渗后含水率为29.6%。该制备标准对应的实际工况(即前文提到的特定情况)为:场地进行电渗加固后,在降雨或者地下水流动的情况下,电渗后土体含水量会出现恢复到或超过电渗前含水量的情况。另外,为了验证电渗排水会排出阳离子的猜想还进行了水质分析实验。

2.2 实验装置

电渗实验装置主要由模型箱和排水管组成,模型箱为塑料盒,长 \times 宽 \times 高=20 cm \times 10 cm \times 6 cm,排水管采用管径为10 mm的塑料管,电渗出的水用注射器抽取。其他实验装置还有:稳压直流电源DCTASI-1305;电极材料采用直径为2 mm,长为12 cm的铁丝。实验进行时,试验箱顶部用保鲜膜封闭,防止水分蒸发。电极布置形式与尺寸见图1。

2.3 实验土样

实验土样取自南京市某河岸,为灰黑色高液限淤泥质土,重塑制备土样。土样土性参数平均值见表1。

2.4 实验步骤

实验包含电渗排水实验、液塑限实验、水质分析实验和直接剪切实验。

实验步骤为:(1)在模型箱中分层密实装入土样并安装电极和玻璃排水管、连接线路、接通电源并调好电压、开始电渗。用32.6 V的电压对试验箱中土样进行60小时的电渗排水,每隔一段时间用注射器吸取阴极玻璃管中上升的水,过滤并装

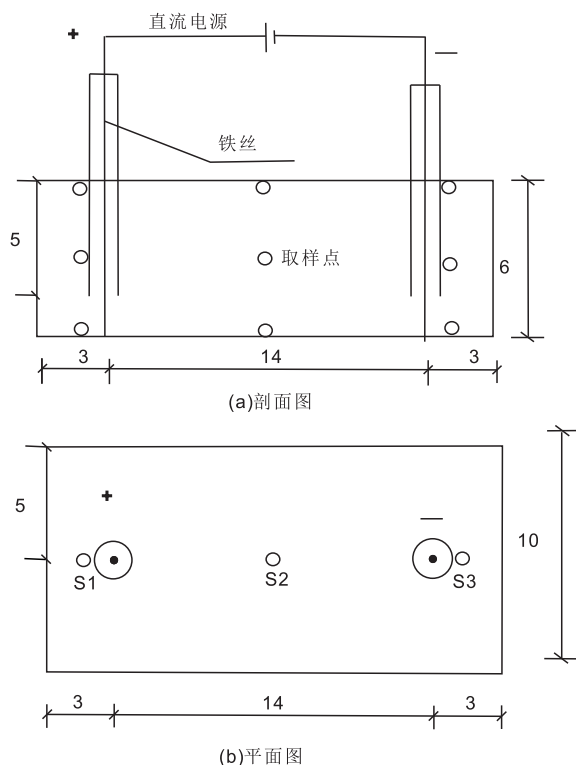


图1 电渗实验装置图 (单位: cm)

Fig. 1 Schematic of testing cell

表1 电渗前的土的物理性质指标

Table 1 Physical properties of soil before electro-osmosis

含水量 / %	液限 / %	塑限 / %	塑性指数	有机质 / %
80	61.3	35.6	25.7	4.6

入离心管用作水质分析, 电渗实验布置图见图2。

(2) 电渗结束后, 取电渗前后的土样分别做液、塑限实验。电渗后分别取S1、S2和S3截面的上、中、下3层土进行液塑限测试, 这样每组实验

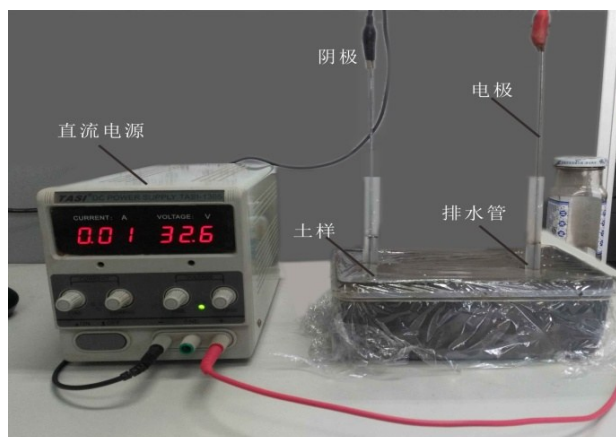


图2 电渗实验布置图

Fig. 2 Test arrangement of electro-osmosis

共有9个液塑限取样点, 各取样点平面及剖面布置如图1所示。S1、S2和S3截面分别为阳极、两极中间和阴极三个截面。对各截面3个测点测得的液塑限取平均作为该截面处的液塑限值。利用液、塑限联合测定法测定土样的液塑限。

(3) 直接剪切实验使用电渗前后的重塑土样进行对比试验。由于电渗模型箱尺寸有限, 取电渗后模型箱里全部土样进行多次直接剪切实验, 并取其平均值作图。先将烘干、粉碎后的干燥粉末加适量的蒸馏水调匀, 再将配制好的土样装入塑料袋, 密闭静置24 h, 以保持土样含水率均匀。养护结束后, 进行制样, 样品制备采用压样法, 分两层压实。采用毛细饱和法对试样进行饱和, 在直剪仪上进行直接剪切试验。直剪仪采用浙江省上虞市制造的SDJ-1A应变式手摇电动直剪仪。

3 实验结果与分析

3.1 水质分析

通过电感耦合等离子体质谱分析技术对电渗排出水中不同阳离子的含量进行检测。实验仪器采用ICAP 6300 DUO型电感耦合等离子体光谱仪。通过检测可知, 电渗排出水中的阳离子主要为 Ca^{2+} 、 Na^{+} 、 K^{+} 和 Al^{3+} , 排出水中各离子质量浓度总量见表2。

由表2可见: (1) 阴极随水排出了大量的阳离子, 为本文提出的电渗机理来解释土体强度衰减和土体开裂的现象提供了有力的证据。(2) 在整个电渗排水过程中, Al^{3+} 排出量特别少, 因为土中的 Al^{3+} 通常是以氧化物(Al_2O_3)的形式存在, 与土不容易脱吸附。

电渗排出水中的各离子的排出速率如图3所示, 质量浓度如图4所示。电渗初始的19 h, 试验排出水中的 Ca^{2+} 速率较大, 明显大于 K^{+} 和 Na^{+} 。说明土中的 Ca^{2+} 最先被排出, 因为高价的 Ca^{2+} 比低价

表2 电渗处理后排出水的水质分析结果

Table 2 Analysis results of water quality of the effluent after electro-osmotic treatment

电渗时间/h	$\text{Al}^{3+}/\times 10^{-6}$	$\text{Ca}^{2+}/\times 10^{-6}$	$\text{K}^{+}/\times 10^{-6}$	$\text{Na}^{+}/\times 10^{-6}$
6	0	353	65	225
12	1	145	64	215
24	1	165	278	999
53	5	23	1960	1453

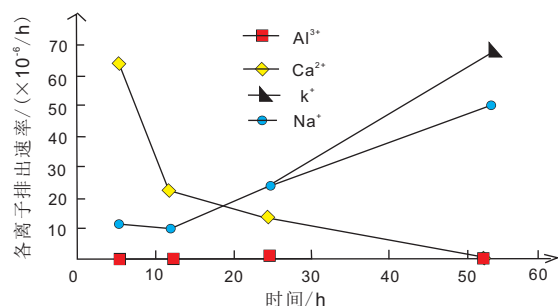


图3 离子排出速率图

Fig. 3 Diagram for ion discharge rate

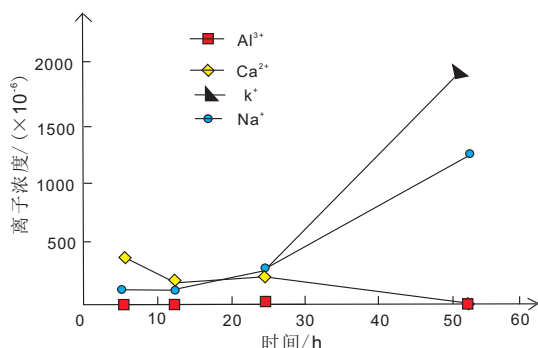


图4 电渗所排水中各离子浓度随时间的变化图

Fig. 4 Variation of ion concentration with time

的 K^+ 、 Na^+ 具有更强的被吸附能力,从而更容易进入阴极随水先排出。在电渗19小时后排出水中的 Ca^{2+} 速率急剧下降,说明土中的 Ca^{2+} 质量浓度减少,之后排出水中主要离子为 K^+ 和 Na^+ 。从图3也可以明显看出电渗15 h之后的 K^+ 和 Na^+ 的质量浓度远大于 Ca^{2+} ,说明随水排出的 K^+ 和 Na^+ 远大于 Ca^{2+} 。

3.2 抗剪强度

前人研究结果表明电渗会使土体强度增加。王协群和邹维列(2007)对电渗前后湖泊相软黏土进行直接剪切实验,得出电渗处理后土体不排水抗剪强度比处理前提高了至少1倍的结论。Bjerrum等(1967)用电渗法加固挪威某基坑,电渗后的土体的平均不排水抗剪强度是电渗前的三倍多。这些结论与本文的实验结论并不矛盾,由于前者的抗剪强度是指排水前后的原状土强度,而电渗后土体含水率下降必然会导致土体抗剪强度的增加。但本文采用重塑土样并保持电渗前后的土样在相同的含水量与干密度情况下进行直接剪切试验,在工程实践中对应的工况为:场地进行电渗加固后,在降雨或者地下水流动的情况下,电渗后土体会出现含水量恢复到或超过电渗前含水量的情

况,但场地土体中的阳离子随水排出却没有得到及时的恢复,导致土体出现暂时性的强度衰减现象。

图5是电渗前后土体在相同含水量和干密度情况下进行直接剪切试验得出的剪应力与垂直压力关系曲线。从图5可见,电渗后土体的凝聚力和内摩擦角均下降,土体出现了强度衰减的现象。根据下文对电渗微观机理的分析可知是因为电渗时阴极排水带走了大量的阳离子,一方面,带负电的黏土颗粒原本靠阳离子胶结在一起,则阳离子的排走会造成黏土颗粒间的连接力下降;另一方面,保持电渗前后含水量相同而电渗后土中阳离子浓度较低则根据双电层理论可知颗粒间水膜变厚因而土体强度下降。

3.3 液塑限

为了探究电渗对土体液塑限的影响,对电渗前后土样的液塑限进行测定,结果如图6所示。结果表明,土样电渗后的液塑限以及塑性指数均下降,塑限的下降幅度较小。根据下文对电渗机理的分析可知是因为电渗排水排出了土中的阳离子从而使土体强度衰减,利用液、塑限联合测定法来测定电渗后的土的液、塑限时,为了使测定电渗前后土样的圆锥有相同的人土深度则只能减小电渗后土样的含水率,因此电渗后的土样的液塑限下降。另外,根据液、塑限的值可以计算得到塑性指数的变化情况,由于液限的下降幅度大于塑限的下降幅度,从而导致了塑性指数的下降。

3.4 电渗实验中的一些现象

电渗实验结束后,阳极铁电极表面出现腐蚀

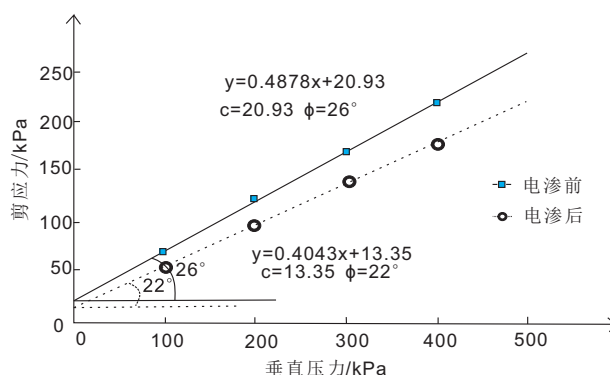


图5 电渗前后淤泥质土剪应力与垂直压力关系曲线

Fig. 5 Relationship between shear stress and vertical pressure before and after electro-osmosis

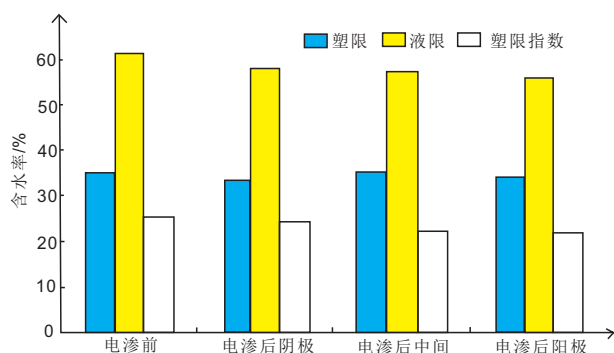
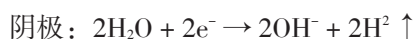
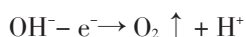
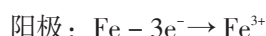


图6 电渗前后淤泥质土各处液塑限和塑性指数

Fig. 6 Liquid, plastic limit and plasticity index before and after electro-osmosis

且附近的土体呈现红褐色，阴极电极表面和附近土中出现白色沉淀物，说明在电渗过程中发生了一系列的化学反应。对于阴极和阳极电极材料均为铁丝的电渗装置，阴极发生的反应主要是水的电解，电解生成的 H^+ 得到从导线中传来的电子，生成了氢气；阳极发生的反应主要为铁棒的腐蚀，电极反应方程式如下：



由于阴阳两极都会有水的电解，阴极电解产生 H_2 ，阳极电解产生 O_2 ，那么阴极就会聚集 OH^- ，并形成碱性环境，阳极就会聚集 H^+ ，并形成酸性环境。酸性环境会使作为阳极电极材料的铁丝发生腐蚀，因此电渗一段时间会发现阳极附近土体部分呈现出红褐色。在电场的作用下，土体中的离子会发生迁移。阳极水电解产生的 H^+ 将会向阴极移动，阴极水电解产生的 OH^- 将会向阳极移动，向阴极移动的阳离子(Ca^{2+} 和 Mg^{2+})会在阴极碱性环境下生成氢氧化物，如 $Mg(OH)_2$ 、 $Ca(OH)_2$ 等，这些氢氧化物会进一步增强土体的胶结，提高土体的强度。另外，氢氧化钙也会与空气中的二氧化碳会生成碳酸钙，碳酸钙对土体也有胶结作用。试验中阴极出现的白色沉淀即为碳酸钙。

4 电渗加固的微观机理分析

为了解释实验中电渗后土体出现的强度衰减的现象，本文引进了分子扩散、半透膜和渗透的概念来阐述不同于已有文献中报道的新的电渗排水加固土体的微观机理。

分子或者离子从高浓度位置向低浓度位置运动的现象称为分子扩散。由于扩散是分子热运动的结果，因此，它与分子或者离子的分子数密度直接相关。溶剂分子从溶质浓度低一侧经过半透膜进入溶质浓度高一侧运动的过程，称为渗透。通常情况下，渗透中的溶剂分子是指水。从某种意义上讲，渗透是扩散作用的特殊形式。水从分子数密度高的位置向分子数密度低的位置运动，即水的扩散。

在自由扩散发生过程中，不需要向体系提供任何能量，扩散将自发进行，并最终达到扩散平衡，即分子数密度相同。但是，在很多情况下自由扩散会被某种条件限制，其中半透膜是限制自由扩散的重要条件。半透膜有选择性地允许某些物质的分子或者离子通过，其它离子或者分子不能通过。如图7所示，漏斗中的蔗糖分子属于大分子，无法通过半透膜，而水分子可以自由通过半透膜。蔗糖分子在漏斗中的分子密度高于烧杯中，但由于蔗糖分子被半透膜阻挡，不能扩散到烧杯中。烧杯中的水分子密度则高于漏斗中水分子密度，而水分子可以自由通过半透膜，水分子不断进入漏斗中。

在土体中也存在渗透现象，但由于半透膜往往很难明确划定而不容易被人们认识。以带电黏土矿物为例，水合阳离子在电场作用下被吸附在颗粒周围，此时电场的作用类似半透膜。不允许阳离子自由离开，排斥阴离子进入，但允许水分子“自由”进出。与阳、阴离子相比，水分子受电场作用较小，水分子可被认为是自由进出。在黏土中存在的电动现象，就是渗透的一个实例。

有了分子扩散、半透膜和渗透的概念，下面

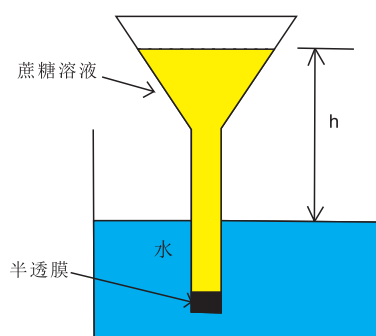


图7 半透膜渗透示意图

Fig. 7 Diagram of semi-permeable membrane permeability

开始详述电渗加固的微观机理,电渗排水中我们都知道阴极水位上升的现象,很多学者都认为阴极水位上升是由于水分子依赖阳离子的迁移作用,即在电场的作用下,阳离子携带着水分子一起向阴极移动。而本文给出的解释如下:由于土中含有粘土矿物以及有机质均表现出带有负电荷特性,并吸附大量的阳离子。而颗粒所带负电荷不能自由运动,阳离子则可以自由运动。由水质分析的结果可知,本文所用土样的主要吸附阳离子是 Ca^{2+} 、 Na^{+} 和 K^{+} 。由于黏性土表面带有不可移动负电荷,因此土中可自由移动的阴离子数量远小于阳离子数量,即向阴极移动的阳离子数量必然大于向阳极移动的阴离子数量。这样就导致了阴极的离子浓度高于阳极,依据前文给出的半透膜理论可知土体中自由扩散的水分子会从离子浓度较低的阳极向离子浓度较高的阴极移动,从而导致阴极玻璃管中的水位上升。

对土体强度而言,阴极排水虽然可以起到排水固结作用,但同时也会排出土中的阳离子。水质分析的结果与上文对电渗微观机理的分析相吻合。为了进一步验证本文对电渗微观机理的分析,在电渗排水结束后,先用注射器抽出阴极管中全部的水,再向阳极管中注入等量的蒸馏水,经过一段时间,发现阴极管中水位并没有明显的上升。该现象表明由于阳离子的排出而使阴阳极的离子浓度差不明显,因此阴极的水位没有明显上升。

另外,本文对电渗机理的分析可以对电渗前后土体具有相近的含水量这一工况出现的强度衰减的现象做出合理的解释,一方面,由于阴极排水带走了土体中大量的阳离子,而带负电的黏土颗粒是依靠阳离子连接的,从而阳离子的流失会造成颗粒间连接力下降,最终导致了土体强度下降;另一方面,根据双电层理论可知,电渗前后保持土体含水量相同而电渗后土中阳离子较少,造成颗粒间水膜联结减弱,因此土体强度降低。

5 电渗裂隙的讨论

本文针对电渗前后土样的物理力学性质进行试验过程中,对于电渗后期土体开裂原因的解释与已有的文献报道存在一定的差异,因此有必要进行讨论。

前人对土体开裂原因的解释多止步于宏观分析,而对于其微观机理的探讨却较少。利用本文提出的电渗机理可以从微观角度解释电渗后期土体开裂现象,即阴极排水带走了大量的阳离子,造成了黏土颗粒间的连接力减弱从而使土体结构强度下降,因此土体出现了裂缝。

在电渗排水试验结束后,发现阴极管附近土体的开裂比阳极严重,土体以阴极管为中心产生较大的径向裂缝(图8)。分析其原因主要有以下两点:(1)阳极腐蚀产生 Fe^{3+} ,补充了土中流失的阳离子,提高了黏粒间的连接力。(2)阳极的含水率下降快,很快进入非饱和状态,快速失水使得阳极附近土体最早产生裂隙,但很快达到稳定。因此阳极由于其含水率较低在电渗后期裂隙并不发育,对于阴极,由于含水率相对于阳极一直较高,因此裂隙可以延长更远,裂隙更宽,开裂表现出比阳极更严重。

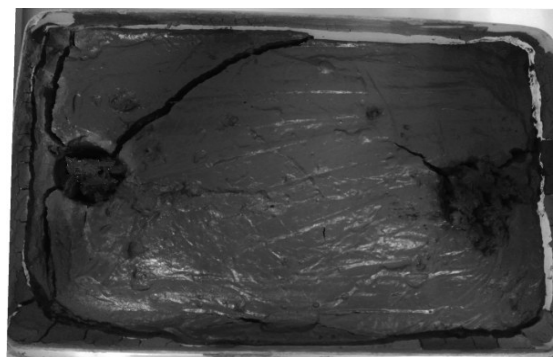


图8 电渗后土体表面裂缝发展情况

Fig. 8 Development of soil surface cracks after electro-osmosis

6 结论

本文采用室内模型试验对比研究了淤泥质土电渗前后的物理力学性质的变化,得到如下结论:

(1) 电渗排水可以提高土体强度这一点毋庸置疑,但电渗后土体在特定情况下会出现强度衰减的现象,如在降雨或者地下水流动的情况下,电渗后土体含水量会出现恢复到或超过原始含水量的情况,而土中随电渗排水排出的阳离子却没有得到及时的补充,因此会导致场地土体出现暂时性的强度衰减现象。该发现在已有文献中未见报道。

(2) 引述分子扩散、半透膜和渗透的概念来分析不同于已有文献中报道的电渗排水加固土体

的微观机理,即土体中自由扩散的水分子会向离子浓度较高的阴极移动。阴极排水虽然可以起到排水作用,但也会排出土中的阳离子,因此在特定情况下会导致土体强度衰减。对电渗排出水的水质分析验证了这一点。另外,在以往工程实践中并未注意到电渗加固过程中土中阳离子流失对电渗后土体性质的影响。

(3) 利用提出的新的电渗机理从微观角度解释了电渗过程中土体开裂现象,阳极因快速失水,最早出现裂隙,但裂隙延展范围较小;阴极含水量始终高于阳极,且失水速度较慢,裂隙延展范围较大。

参考文献(References):

- 符洪涛,王军,蔡袁强等. 2015. 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, 3(34): 612-620.
- 李瑛,龚晓南. 2012. 等电势梯度下电极间距对电渗影响的试验研究[J]. 岩土力学, 33(1): 89-95.
- 李苗,张林洪,王苏达. 2007. 电渗法处理填土地基的排水效果影响因素分析[J]. 岩土工程技术, 21(1): 4-6, 10.
- 李瑛,龚晓南,焦丹,等. 2009. 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, 28(增2): 4034-4039.

陶燕丽. 2015. 不同电极电渗过程比较及基于电导率电渗排水量计算方法[D]. 杭州: 浙江大学.

汪闻韶. 1999. 汪闻韶院士土工问题论文选集[M]. 北京: 中国建筑工业出版社.

王协群,邹维列. 2007. 电渗排水法加固湖相软黏土的试验研究[J]. 武汉理工大学学报, 29(2): 95-99.

庄艳峰,王钊,林清. 2005. 电渗的能级梯度理论[J]. 哈尔滨工业大学学报, 37(2): 283-286.

Bjerrum L, Mowm J and Eide O. 1967. Application of electroosmosis to a foundation problem in a norwegian quick clay [J]. Geotechnique, 17: 214-235.

Casagrande L. 1952. Electro-osmotic stabilization of soils [J]. Journal of the Boston Society of Civil Engineering, 39: 51-83.

Glendinning S, Lamont-Black J and Jones C J F P. 2007. Treatment of sewage sludge using electrokinetic geosynthetics [J]. Journal of Hazardous Materials, A139: 491-499.

Hoeksema R J. 2007. Three stages in the history of land reclamation in the Netherlands [J]. Irrigation and Drainage, 56: 113-126.

Shang J Q and Loky. 1997. Electrokinetic dewatering of a phosphate clay [J]. Journal of Hazardous Materials, 55: 117-133.

Yang L A. 2003. Mechanics of the consolidation of a lumpy soft clay fill [D]. Singapore: National University of Singapore.