文章编号:1673-9469(2023)02-0065-06 DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2023.02.010

聚丙烯酰胺对水泥固化砂土性能的影响

俞 翔[1,2],曹天赐[1,2],白兰兰[3],商志阳[1,2],戴 迪[1,2],彭 劼[1,2*]

(1.河海大学 土木与交通学院,江苏 南京 210098;2.河海大学 岩土工程科学研究所,江苏 南京 210098;
3.苏交科集团股份有限公司,江苏 南京 210019)

摘要:针对传统水泥固化土耐久性较差的特点,通过对加入三种不同吸水性能聚丙烯酰胺(PAM)的水泥固化砂土进行无侧限抗压强度试验、干湿循环试验、干缩试验以及SEM电镜扫描试验,对不同吸水性能的PAM改善水泥固化土的强度、耐久性以及微观机理进行研究分析。试验结果表明:PAM的掺入可有效提高水泥固化土的强度,而PAM吸水性能的不同会导致水泥固化土的强度呈现出一定的规律性变化;PAM的掺入可有效改善水泥固化土的耐久性能,相对而言,强吸水性能PAM对于水泥固化土的耐久性表现出更好的改善作用;PAM掺入水泥固化土后形成PAM-水泥石-土颗粒的整体胶结结构,增强了水泥固化土的强度和抗干缩开裂的能力。

关键词:水泥固化土;聚丙烯酰胺;力学特性;微观机理

中图分类号:TU411 **文献标识码**:A

Effect of Polyacrylamide on the Properties of Cement Stabilized Sand

YU Xiang[1,2], CAO Tianci[1,2], BAI Lanlan[3], SHANG Zhiyang[1,2], DAI Di[1,2], PENG Jie[1,2*]

(1. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University , Nanjing, Jiangsu 210098, China;
2. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China;
3. JSTI Group, Nanjing, Jiangsu 210019, China)

Abstract: In view of the poor durability of traditional cement solidified soil, the unconfined compressive strength test, dry-wet cycle test, dry shrinkage test and SEM electron microscope scanning test were carried out on the cement solidified sand with three different water absorption properties of polyacrylamide (PAM). The strength, durability and microscopic mechanism of PAM with different water absorption properties to improve cement solidified soil were studied and analyzed. The test results show that the incorporation of PAM can effectively improve the strength of cement solidified soil, and the different water absorption properties of PAM will lead to a certain regular change in the strength of cement solidified soil. The incorporation of PAM can effectively improve the durability of cement stabilized soil. Relatively speaking, the strong water absorption PAM shows a better impact on the durability of cement stabilized soil. After PAM is mixed with cement solidified soil, the overall cementation structure of PAM-cement stone-soil particles is formed, which enhances the strength and dry shrinkage cracking resistance of cement solidified soil.

Key words: cement stabilized soil; polyacrylamide; mechanical properties; microscopic mechanism

在城市化进程飞速发展的背景下,我国东南部地区的建设规模日益扩大,大量的工程建设项目中都需要优质填土,而东南地区土体多为饱和软土,通常具有强度低、压缩性大、工后沉降显著等特点,无法直接用于工程建设。为遵循我国环境可持续友好发展的理念,对这些不良土质进行改良,将其资源化利用成为一种必然趋势。传统的地基处理方法如换填法、加筋法、灌浆法等普遍

收稿日期:2022-11-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51578214);江苏省交通运输厅科技成果转化项目(2021QD07)

作者简介:俞翔(2001-),男,福建宁德人,硕士研究生,主要从事软土固化方向的研究。

*通讯作者:彭劼(1971-),男,湖南衡阳人,博士,教授,主要从事软土地基处理方面相关研究。

具有工期长、耗费高等不足[1],而采用传统单一固化剂(水泥、石灰)进行加固土体往往难以达到理想效果[2],并且存在高能耗、环境污染等问题。因此寻找一种能够改善传统固化技术缺点的材料成为人们所关心的问题。聚丙烯酰胺(polyacrylamide,PAM)作为一种土壤改良剂,不但具有传统固化剂的固化效果,并且具有环保无毒、经济适用的优点,近年来备受关注。

水泥作为工程中常用的固化剂之一,学者们对其在工程应用中加固土体的效果和机理等多个方面进行了分析研究。研究发现:经水泥固化后有助于提高土体强度并降低土体的压缩变形,且干缩性能得到一定改善,但在浸水湿化等不良环境作用下会对其强度和变形产生不利影响[3],且水泥的含量和种类不同对土体加固的效果也会有所差异[4-5]。PAM是一种溶于水后呈软凝胶状,能够胶结团聚土颗粒,增强土壤粘聚力和保水性的高分子材料,其分子量大,水溶性强,由于其独特的理化特性从而被应用于众多不同的行业[6]。近年来,关于采用PAM改良土体性能的研究引起了学者们的关注:Zhang等[7]对盐渍土未处理和PAM处理后的稠度、压实度、微观结构等进行了研究,研究发现PAM含量的增加减少了盐渍土的收缩应变和缺陷;李中尧等[8]通过无侧限抗压强度试验和直接剪切试验发现采用PAM含量为0.4%、木质素含量2%的复合改良剂对西藏地区黏土有较好的改良效果。胡芹龙等[9]通过对加入不同掺量的PAM-有机硅水泥土试样进行渗透试验,发现水泥土渗透系数随着PAM或有机硅掺量的增加呈现出先减后增的变化趋势,水泥土中PAM掺量为3%、有机硅掺量为3%和PAM掺量为1%、有机硅掺量为5%是水泥土抗渗性能提高的两种最优掺量。Zhang等[10]研究了水泥固化土在添加不同含量的PAM之后的强度和微观结构的变化,实验结果为PAM材料对水泥固化土土体性能的改善提升存在最优配比,高于此比例反而会对水泥固化土的强度增长以及发展产生不利影响。

上述研究表明:PAM对于土壤的改良研究主要集中在PAM掺量[10-11]方面,而针对PAM的理化性质对土壤改良效果方面的研究尚不充分。针对该问题,本文选定三种不同吸水性能的PAM,通过无侧限抗压强度试验、干湿循环试验以及干缩试验对比分析掺入不同吸水性能的PAM对水泥固化土的强度、耐久性能的影响规律,并通过SEM电镜扫描试验观察其改善水泥固化土的微观机理。

1 试验概况

1.1 试验材料

1.1.1 试验用土

试验用土取自南京市江北新区横江大道建设工程段,具有结构松散、保水性差的特点。根据《GB/T 50123—2019 土工试验方法标准》的要求对土样的基本物理性质参数进行了试验,试验结果如表1和图1所示。根据《GB/T 50145—2007 土的工程分类标准》中土的分类可知该试验用土划分为粉土质砂。

表1 土样的基本物理参数

Tab. 1 Basic physical parameters of the soil sample

含水率/%	孔隙比 e	最优含水率/%	塑限/%	液限/%	塑性指数 I_p	有机质含量/%
26.18	0.69	15.94	17.86	24.06	6.2	1.58

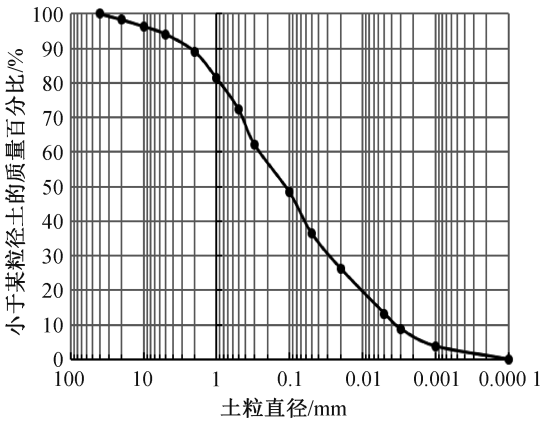


图1 粒径分布图

Fig. 1 Particle size distribution soil

1.1.2 水泥

试验采用的主固化剂为海螺牌P·O42.5号普通硅酸盐水泥,对水泥的主要化学成分进行了测定。试验结果如表2所示。

表2 水泥化学成分 (单位:%)

Tab. 2 Chemical composition of cement (unit: %)

成分	CaO	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	SO_3
含量	56.97	25.4	7.3	3.98	4.85	1.5

1.1.3 聚丙烯酰胺

本试验所用的次固化剂为聚丙烯酰胺(PAM),对三种PAM的相对分子质量、pH、吸水性能等性质进行了测定,其中吸水性能依据《GB/T 17514—2017 水处理剂阴离子和非离子型聚丙烯

酰胺》中的方法进行检测,在一定条件下,水解度越大,吸水性能越好[12]。试验所用的三种不同吸水性能的聚丙烯酰胺材料参数如表 3 所示:

表 3 聚丙烯酰胺参数

Tab. 3 Polyacrylamide parameters

相对分子质量/×10⁴	水解度/%	pH 值	离子型	外观	吸水性能
1 200	40	5~8	阴离子	白色晶体	强
1 200	30	5~8	阴离子	白色晶体	中
1 200	20	5~8	阴离子	白色晶体	弱

1.2　无侧限抗压强度试验

无侧限抗压试样以粉土质砂为原料,根据干土质量的 4% 添加水泥以及 0%、0.1%、0.2%、0.3%和 0.5%的比例分别添加强中弱三种不同吸水性能的 PAM,形成水泥和 PAM 的复合固化土。试验前将土样恢复至 26%的原状含水率,掺料搅拌均匀后闷料 24 h,参照《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTG E51—2009)的要求制备,试样制备完成后放入标准养护箱(温度(20±2)℃,相对湿度≥95%)养护 28 d 测定其强度。

1.3　干湿循环试验

为了模拟现场道路在高温多雨的环境下质量变化和强度变化情况,参考《(ASTM)D4843-88》的方法进行干湿循环试验[13]。将不同配比的干湿循环试样,经过标准养护条件养护 28 d 后置于(45±3)℃的烘箱中低温烘干 24 h,再放入加入水的干湿循环模具中静置 24 h,取出后置于(20±3)℃的养护箱中养护 24 h,此为 1 个循环,共进行 10 个循环,并且每次循环后将剥落的试样烘干称取质量,测定经过 3、5、10 次循环后的无侧限抗压强度,分析掺入不同吸水性能的 PAM 对试样抵抗干湿循环作用的影响。

1.4　干缩试验

为了测定掺入不同吸水性能的 PAM 材料后对水泥固化土干缩性能的影响,对掺入三种不同吸水性能 PAM 材料的水泥固化土进行了干缩性能测试。将土样含水率恢复至 26%的原状含水率备用,试样参照《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTG E51—2009)的要求制备并养护 7 d,养护完成后将其移到干缩箱(温度(20±1)℃,相对湿度(60±5)%)。试验前 7 d,每日记录试样的干缩应变,8 到 30 d 每 2 天记录试样的干缩应变。干缩试样示意图如图 2 所示。

图 2　干缩试样示意图

Fig. 2　Schematic diagram of shrinkage sample

1.5　SEM 电镜扫描试验

为了从微观上研究 PAM 吸水性能改善水泥固化土的机制,取水泥固化土与含强和弱吸水性能的 PAM 水泥固化土进行对比,分别将其填装到注射器中进行养护 7 d 后将试样切成厚度为 1 cm 左右的圆饼状进行电镜扫描试验。

2　试验结果与分析

2.1　PAM 对无侧限抗压强度的影响

图 3 为 4%水泥+不同吸水性能 PAM 配比试样的无侧限抗压强度(q_u)随 PAM 掺量的变化关系。从中可以看出:随着 PAM 掺量的增加,不同配比的试样 q_u 均为先增加后减小。在曲线上升阶段,试样的 q_u 与 PAM 的吸水性能呈正相关,且存在一个拐点,其对应的掺量为 0.2%,当掺量大于 0.2%后,试样的 q_u 开始降低,并且转变为与 PAM 的吸水性能呈负相关。在试验含水率条件下,0.2%PAM 的掺量能够保持不同配比试样的 q_u 均处于最高值,故在后续相关试验中采用 0.2%PAM 含量的配比。

2.2　PAM 对固化土抵抗干湿循环作用的影响

对经养护 28 d 的无侧限试样进行干湿循环试验,分别记录其每次循环模具中剥落试样的烘干质量,以及测定经过 3、5、10 次循环后试样的 q_u。干湿循环过程中试样质量损失量随循环次数的变化规律如图 4 所示,从中可见,每次循环过后仅添加水泥的无侧限试样质量损失量均较高,且在第 5 次循环过后试样破坏。添加水泥+不同吸水性能 PAM 的固化土在前 5 次循环中的质量损失量也相对较高,但低于水泥固化土。10 次循环后水泥+

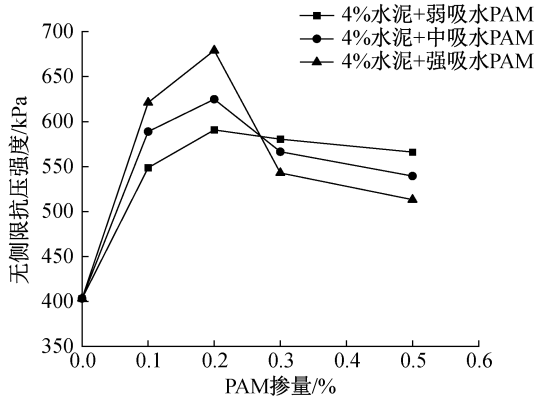


图 3 无侧限抗压强度与 PAM 掺量、吸水性能的关系

Fig. 3 Relationship between unconfined compressive strength, PAM content and water absorption

弱、中、强吸水性能 PAM 的固化土总质量损失量分别为 15.2、10.9 和 10.7 g。相对而言,水泥+弱吸水性能 PAM 固化土试样质量损失量最大,水泥+强吸水性能 PAM 固化土质量损失量最小。

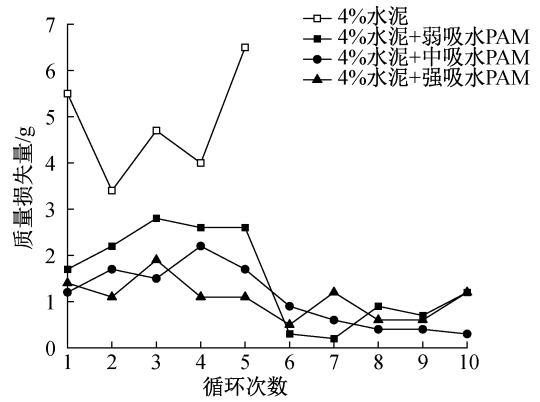


图 4 试样质量损失量随循环次数变化的曲线

Fig. 4 The curve of the mass loss of the sample as a function of the number of cycles

试样的 q_u 随干湿循环次数的变化曲线如图 5 所示。从中可见:对于仅添加水泥的固化土,随着循环次数的增加,在干湿交替变化的作用下,试样的 q_u 随之降低,并且在第 5 次循环之后破坏,这是由于温度和湿度不断变化对水泥固化土的结构造成了负面影响,通过水泥固化土在干湿循环条件下的质量损失变化情况也能够印证这一点。对于水泥+不同吸水性能 PAM 固化土的 q_u 大体上均表现为逐渐下降的趋势,水泥结合从弱到强三种吸水性能 PAM 的固化土经过 10 次干湿循环后的 q_u 分别为 359.7、377.8 和 398.1 kPa,其中以水泥+强吸水性能 PAM 固化土的 q_u 最高。

综上所述,掺入 PAM 可以改善水泥固化土的抗干湿循环性能。其中,与掺入弱或中吸水性能

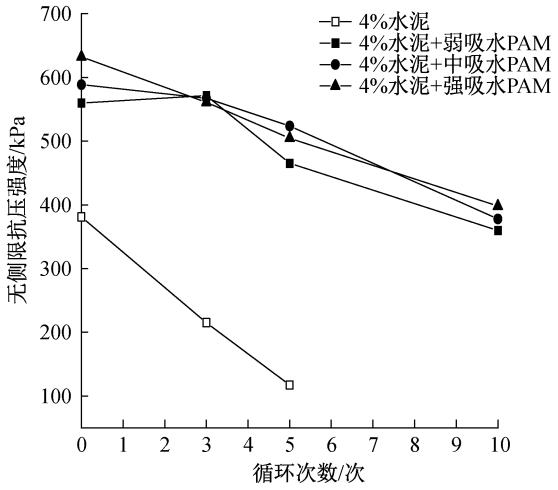


图 5 试样无侧限抗压强度随循环次数的变化曲线

Fig. 5 Variation curve of unconfined compressive strength of samples with the number of cycles

的 PAM 相比,掺入强吸水性能的 PAM 效果更好。

2.3 PAM 对固化土干缩性能的影响

为进一步明确掺入不同吸水性能 PAM 对水泥固化土的影响,将土样含水率恢复至原状含水率后,对不同配比的固化土进行焖料、制样,将成型的试样在标准养护条件下养护 7 d 后进行了干缩试验。

水泥固化土及含三种不同吸水性能 PAM 的水泥固化土干缩应变随时间的变化关系如图 6 所示。从中可见:随着试验天数的延长,水泥固化土以及含三种不同吸水性能 PAM 的水泥固化土的干缩应变均随着试验天数的延长而增加。其干缩应变增长速率都是在试验开始后的 7 d 左右时开始放缓,但含 PAM 水泥固化土的干缩应变量在 15 d 左右时即达到稳定,而水泥固化土的干缩应变量直到 27 d 左右时达到稳定。水泥固化土 60 d 的干缩应变量为 $7\ 195 \times 10^{-6}$,含弱、中、强三种吸水性能 PAM 的水泥固化土 60 d 的干缩应变量分别为 $5\ 275 \times 10^{-6}$、$4\ 975 \times 10^{-6}$、$4\ 850 \times 10^{-6}$,后者较前者的 60 d 干缩应变分别减少 26.7%、30.9%、32.6%。

试样的失水率随试验天数的变化关系曲线如图 7 所示。由图可知:水泥固化土、含不同吸水性能 PAM 的水泥固化土失水率随着试验天数的延长渐次减少,最后趋于稳定。就 30 d 累计失水率来看,水泥固化土失水率最大,为 13.6%,强吸水性能 PAM 水泥固化土的失水率最小,最终失水率为 11.1%,掺入弱吸水性能 PAM 的水泥固化土最终失水率为 12.5%,中吸水性能 PAM 水泥固化土

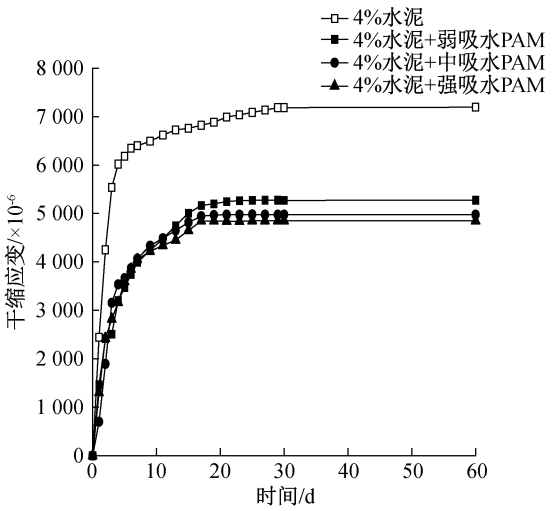


图 6　干缩应变随时间的变化关系

Fig. 6　Variation of drying shrinkage strain with time

最终失水率为 11.5%。

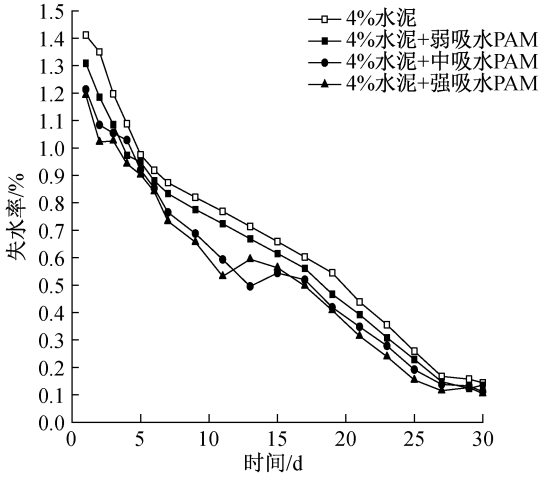


图 7　失水率随时间变化的关系曲线

Fig. 7　The relationship curve of water loss rate with time

通过上述分析可以看出掺入 PAM 可以改善水泥固化土的干缩性能,且与掺入弱、中吸水性能的 PAM 相比,掺入强吸水性能的 PAM 对水泥固化土的改善作用更好。

2.4　微观分析

土的微观结构对土的工程性质有较大影响,即使是同种土样,其原状土和扰动土的力学性质也差别显著。土的微观结构主要由土颗粒的结构单元特征、孔隙性、颗粒排列特征和接触关系等要素构成[14]。随着当代科学技术的发展,电子成像技术在土壤的微观结构观测中已经被学者们广泛运用。通过 SEM 电镜扫描技术可以较为直观地了解土壤中的土颗粒形态、孔隙特征、排列情况等。

表 4 为采用水泥、水泥+弱吸水性能 PAM 以及水泥+强吸水性能 PAM 固化土的 7 d 无侧限抗压强度试验结果。为揭示含不同吸水性能 PAM 的水泥固化土强度差异的原因,现利用 SEM 技术观测三者的微观形态及孔隙特征的变化规律,如图 8 所示。可以发现,图 8(a)中水化产物较为清晰,多以片状和短针状结构为主,该物质应为水泥水化产生的水化硅酸钙(C-S-H),C-S-H 包裹覆盖在颗粒骨架上方的同时也有部分镶嵌在骨架颗粒之间,增加土体内的粘结性,强化水泥固化土的强度。图 8(b)和图 8(c)可以观察到明显的纤维网状结构,表明土颗粒表面已经吸附了一定的 PAM,这些 PAM 吸附在水泥石和土颗粒表面的同时也发挥着胶结作用,形成 PAM-水泥石-土颗粒的整体胶结结构,不但增强了水泥固化土的强度,还增强了其抗干缩开裂的能力。通过图 8(b)和图 8(c)的对比并不能明显观察到 PAM 吸水性能的差异导致含 PAM 水泥固化土强度的不同,这可能与 PAM 自身的结构和理化性质[15]有关,其在制造过程中的颗粒粒径大小和其分子链上的基团比例对此均有一定的影响。

表 4　不同配比下固化土无侧限抗压强度

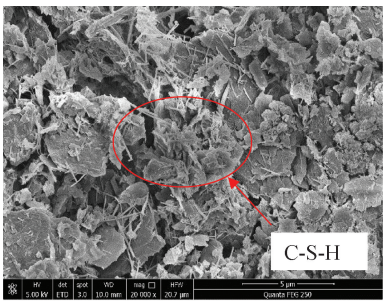
Tab. 4　Unconfined compressive strength of solidified soil under different ratios

固化剂配比	龄期/d	无侧限抗压强度/kPa
4%水泥	7	228.1
4%水泥+0.2% 弱吸水性能 PAM	7	447.0
4%水泥+0.2% 强吸水性能 PAM	7	553.8

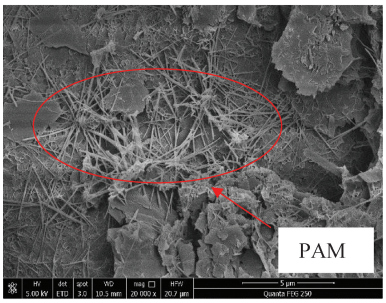
3　结论

通过无侧限抗压强度试验、干湿循环试验、干缩试验以及 SEM 电镜扫描试验,对不同吸水性能 PAM 改善水泥固化土的强度、耐久性能和微观结构进行了研究,对比了加入 PAM 材料之后水泥固化土相关性能指标的变化,分析了掺入不同吸水性能的 PAM 对水泥固化土的强度、耐久性能以及微观结构的影响。得到如下结论:

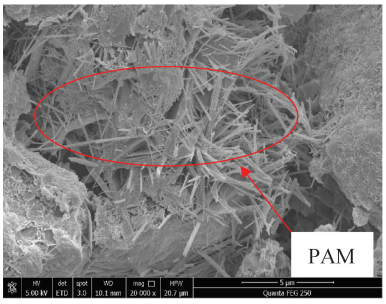
1)不同吸水性能的 PAM 材料应用于水泥固化土,在水泥含量相等的情况下,试样的 q_u 均随着 PAM 含量先增加后降低,在掺量 0.2%时 q_u 达到最大值;PAM 掺量小于 0.2%时,试样的 q_u 随着所掺 PAM 吸水性能的增强而增大,掺量大于 0.2%之后,试样的 q_u 随着 PAM 吸水性能的增强而减小。



(a) 4%水泥



(b) 4%水泥+0.2%弱吸水性能PAM



(c) 4%水泥+0.2%强吸水性能PAM

图 8 不同配比固化土 7 d 电镜扫描对比图

Fig. 8 7 d electron microscope scanning comparison chart of different proportions of solidified soil

2)适量的 PAM 材料应用于水泥固化土,可明显改善水泥固化土的耐久性能。与纯水泥固化土和含弱、中吸水性能 PAM 的水泥固化土相比,含强吸水性能 PAM 的水泥固化土具有更好的抗干湿循环能力和抗干缩性能,即强吸水性能 PAM 对于水泥固化土耐久性的改善作用更好。

3)通过 SEM 技术可观察到 PAM 掺入水泥固化土后吸附在水泥石和土颗粒表面发挥着胶结作用,形成 PAM-水泥石-土颗粒的整体胶结结构,增强了水泥固化土的强度和抗干缩开裂的能力,但由于 PAM 自身独特的结构和理化性质,通过电子影像并不能明显观察到 PAM 吸水性能的差异对于水泥固化土强度的影响。

参考文献:

[1] 赵晓婉,许益东,戴 迪,等. 高分子吸水树脂加固水泥固化土的路用性能试验研究[J]. 工业建筑,2021,51(11):154-158.

[2] 庹秋水,朱剑锋,饶春义. 固化有机质土的抗剪强度试验研究[J]. 泥沙研究,2017,42(5):70-74.

[3] 陆卫东. 湿化条件下水泥固化土的强度与变形特性分析[J]. 山西建筑,2022,48(6):82-86.

[4] 施海建,张福海,袁赛峰,等. 水泥改良西藏林芝地区粉土路用性能试验研究[J]. 河北工程大学学报:自然科学版,2018,35(1):66-70.

[5] 叶至韬,高玉峰,王昕远,等. 自密实水泥土拼宽路堤沉降与稳定性研究[J]. 河北工程大学学报:自然科学版,2020,37(4):52-56+93.

[6] BARVENIK F W. Polyacrylamide Characteristics Related to Soil Applications[J]. Soil Science, 1994, 158(4): 235-243.

[7] ZHANG T, DENG Y, LAN H, et al. Experimental Investigation of the Compactability and Cracking Behavior of Polyacrylamide-Treated Saline Soil in Gansu Province, China[J]. Polymers, 2019, 11(1): 90.

[8] 李中尧,史海平,李文炜,等. 冻融循环对西藏地区聚丙烯酰胺和木质纤维素改良黏土力学性能影响研究[C]//2022 年工业建筑学术交流会. 北京:中冶建筑研究总院有限公司,2022:403-408+420.

[9] 胡芹龙,侯淑鹏,叶长文,等. PAM-有机硅改性水泥土抗渗性能试验研究[J]. 科学技术与工程,2017,17(7):242-248.

[10] ZHANG Y P, SHEN X D. Experimental Study of the Impact of PAM on Cement Soil Strength[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 174-177.

[11] CHANG T H, CHANG H W. Improvement of Liquefaction Resistance of Reclaimed Sand in Water-An Experimental Study[J]. Journal of GeoEngineering, 2010, 5(2): 39-49.

[12] 刘宪红. 水解度对聚丙烯酰胺树脂吸水性能的影响[J]. 科学技术创新,2020(31):187-188.

[13] 查甫生,刘晶晶,许 龙,等. 水泥固化重金属污染土干湿循环特性试验研究[J]. 岩土工程学报,2013,35(7):1246-1252.

[14] 朱剑锋,杨 浩,徐日庆,等. 硫氧镁水泥固化沿海风电场滩涂软土加固机理及微观特性分析[J]. 太阳能学报,2022,43(7):276-283.

[15] 闫晓前,张勋江. 聚丙烯酰胺的理化特征及在黄土区减流减蚀应用前景[J]. 干旱地区农业研究,2008(3):189-192.

(责任编辑 周雪梅)