

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2023.01.013

高分子吸水树脂对无机结合料固化土工程性质的影响

彭 劼^{1,2}, 商志阳^{1,2}, 曹天赐^{1,2}, 赵晓婉³, 戴 迪^{1,2}

(1. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 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. 包钢勘察测绘研究院, 内蒙古 包头 014010)

摘要: 针对传统无机结合料固化土普遍存在的耐久性及干缩性差的问题, 在无机结合料加固淤泥质黏土的基础上添加高分子吸水树脂(SAP)材料, 通过无侧限抗压强度试验、击实试验、干湿循环试验、干缩变形试验与XRD测试, 分析了SAP材料对无机结合料固化土工程性质的影响及其作用机理。结果表明: 掺入SAP材料不仅可以提高无机结合料固化土的无侧限抗压强度, 还能显著改善无机结合料固化土的压实性、耐久性与干缩性能; SAP材料主要依靠填充作用改善无机结合料固化土的工程性质。

关键词: 高分子吸水树脂; 无机结合料; 压实度; 干缩变形; 微观机理

中图分类号: TU472 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2023)01-0099-06

Effect of super absorbent polymer on engineering properties of soil solidified by inorganic binder

PENG Jie^{1,2}, SHANG Zhiyang^{1,2}, CAO Tianci^{1,2}, ZHAO Xiaowan³, DAI Di^{1,2}

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing 210098, China;

3. Baotou Steel Survey and Mapping Research Institute, Baotou 014010, China)

Abstract: Aiming at the common problems of poor durability and dry shrinkage performance of traditional inorganic-binder solidified soil, super absorbent polymer (SAP) material was added on the basis of mucky clay reinforced by the inorganic binder. Through the unconfined compressive strength test, compaction test, dry wet cycle test, dry shrinkage deformation test and XRD test, the influence and action mechanism of SAP material on the engineering properties of inorganic-binder solidified soil were analyzed and discussed. The test results show that the addition of SAP material can not only improve the unconfined compressive strength of inorganic-binder solidified soil, but also significantly improve the compactness, durability and dry shrinkage performance. Mechanism analysis shows that SAP material mainly depends on the filling effect to improve the engineering properties of inorganic-binder solidified soil.

Key words: super absorbent polymer; inorganic binder; compactness; shrinkage deformation; micro mechanism

我国东南沿海地区道路及市政建设开挖的软土多具有含水率和压缩性高、强度和渗透性低等特点。目前, 对开挖软土常用的加固方法主要有换土法、加筋法、灌浆法、复合地基法与排水固结法^[1-2]。在土体中添加土壤固化剂属于综合加固法^[3], 固化剂生成胶凝物质后胶结土体颗粒、填充土体孔隙, 从而改善和提高土体的工程特性^[4-5]。无机结合料如水泥、石灰在地基处理中得到了广泛应用, 已有多名学者对无机结合料的力学特性^[6-9]、加固机理^[10]等多个方面进行了研究, 认为无机结合料的掺入会使原状土强度得到明显提高, 但会增加原状土的脆性, 同时干湿循环过程也会导致固化土强度降低^[11]。

高分子材料作为一种经济绿色的土壤固化剂近年来得到了广泛关注, 但目前已有的研究主要集中于各种无机固化材料与高分子材料加固土体的应用^[12-13]、固化效果^[14]与加固机理^[15]等方面。刘瑾等^[16]将一种聚氨酯型高分子固化剂用于土体改良中, 发现加固后土体黏聚力大大提高, 且渗透性能得到改善; 王银梅

作者简介: 彭劼(1971—), 男, 教授, 博士, 主要从事岩土工程教学研究。E-mail: peng-jie@hhu.edu.cn

引用本文: 彭劼, 商志阳, 曹天赐, 等. 高分子吸水树脂对无机结合料固化土工程性质的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(1): 99-104.

PENG Jie, SHANG Zhiyang, CAO Tianci, et al. Effect of super absorbent polymer on engineering properties of soil solidified by inorganic binder[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2023, 51(1): 99-104.

等^[17]研制出一种亲水性强、能以任何比例溶于水的 SH 型固砂剂,并对其改良黄土的抗冻性能以及抗老化性能的效果进行了研究,为沙漠化治理提供了新方法。Deng 等^[18]将聚丙烯酰胺(PAM)作为盐渍土的外掺剂,改善了固化土的耐久性,且固化土的最大干密度随着 PAM 含量的增加而减小。

淤泥质黏土具有强度低、含水率高、渗透性小、孔隙比大等特点,长期以来如何对其进行处理成为困扰工程人员的一大难题。将高分子固化剂运用在固化土中,可以有效解决无机固化材料固化效率低、受土中有机质影响大、土体易开裂以及水稳性差等问题。研究表明土中含水率越高固化土的强度就会越低^[19-21],因此为了改善固化土的力学特性,需要添加大量的水泥材料或者其他外掺剂。本文使用的高分子吸水树脂(SAP)属于聚丙烯酸类,由悬浮聚合和共价交联的丙烯酰/丙烯酸共聚物组成,是一种含有羟基、羧基等强亲水性基团并具有一定交联度的三维网络结构的新型功能高分子材料。由于其具有独特的高吸水性以及高保水性,目前多被应用于混凝土的自收缩改善^[22]、裂缝修复^[23]、疏浚淤泥改性^[24]、重金属污染土^[25]等方面,但 SAP 材料对无机结合料加固淤泥质黏土的工程性质(压实性、耐久性、干缩性等)的影响尚不充分。本文依托南京市横江大道建设工程,利用 SAP 材料,通过无侧限抗压强度试验、击实试验、干湿循环试验、干缩变形试验以及 XRD 测试,分析 SAP 材料对无机结合料固化土的强度、压实性、耐久性、干缩性的影响,同时研究了 SAP 的加固机理。

1 试验概况

1.1 试验材料及方案

1.1.1 试验用土

试验用土取自南京市横江大道建设工程试验段开挖土,根据 GB/T 50123—2019《土工试验规程》的要求对其基本物理性能指标以及矿物成分进行了测试。开挖土的原状含水率为 38.5%,孔隙比为 1.31,最优含水率为 16.6%,液限为 38.4%,塑限为 18.2%,有机质的质量分数为 1.35%,SiO₂、绿泥石、伊利石、方解石的质量分数分别为 38.6%、10.9%、25.0%、25.5%,粒径分布如图 1 所示。

1.1.2 固化材料

水泥采用海螺牌 P·O42.5 普通硅酸盐水泥,生石灰采用惠灰牌高纯度生石灰粉。SAP 采用南京赛普公司生产的聚丙烯酸盐类高分子吸水树脂(HE-300),表征高分子吸水树脂吸水性的主要指标是吸水倍率,利用茶袋法^[26]测定其吸水倍率约为 60 倍。

1.1.3 试验方案

试样的制备方法:试样参照 JTG E40—2007《公路土工试验规程》的要求进行制备。试验前先将筛去杂质的风干土恢复至原状含水率,闷料 1 d 后加入不同配比的 SAP 材料继续闷料 1 d,对于掺有石灰的对照组将石灰与 SAP 材料同时混合掺入闷料,同时在制样时掺入不同比例的水泥,随后用水泥净浆搅拌机搅拌,为增加均匀性,最后用搅拌刀搅拌至均匀。本文将 0%、2%、4%、6% 的水泥和石灰分别与 0%、0.15%、0.3%、0.45% 的 SAP 材料进行混合,根据不同的水泥、石灰含量和 SAP 掺量,共设计试验配比 25 组,具体试验方案见表 1。

1.2 无侧限抗压强度试验

无侧限抗压试样参照 JTG E40—2007《公路土工试验规程》的要求进行制备。试验前先将筛去杂质的风干土恢复至 38.5% 的原状含水率,掺入 SAP、石灰闷料 1 d 后进行制样,在制样时掺入水泥。试样为 5 cm × 5 cm 的圆柱体,满足路基填筑 94% 压实度要求。试样制作完成后放入 (20±2) °C、95% 湿度的标准养护箱中进行养护,并在 7 d、14 d、28 d 测定其无侧限抗压强度。

1.3 击实试验

根据 JTG D30—2015《公路路基设计规范》要求路基压实度最低不得低于 94%。压实度是指施工现场实际达到的干密度与室内标准击实试验所得的最大干密度的比值,是道路工程施工质量管理最重要的内在

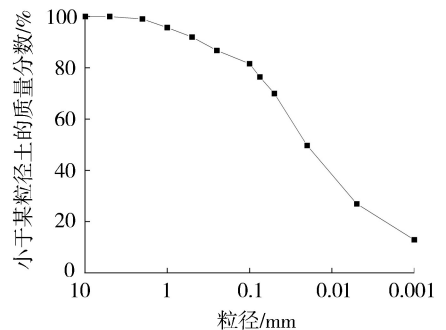


图 1 试验用土粒径分布
Fig. 1 Curve of particle size distribution of test soil

表 1 试验方案
Table 1 Test scheme

方案编号	水泥质量 分数/%	石灰质量 分数/%	SAP 质量 分数/%	方案编号	水泥质量 分数/%	石灰质量 分数/%	SAP 质量 分数/%
C0L0S00	0	0	0	C2L2S00	2	2	0
C2L0S00	2	0	0	C4L2S00	4	2	0
C4L0S00	4	0	0	C6L2S00	6	2	0
C6L0S00	6	0	0	C2L2S15	2	2	0.15
C2L0S15	2	0	0.15	C2L2S30	2	2	0.3
C2L0S30	2	0	0.3	C2L2S45	2	2	0.45
C2L0S45	2	0	0.45	C4L2S15	4	2	0.15
C4L0S15	4	0	0.15	C4L2S30	4	2	0.3
C4L0S30	4	0	0.3	C4L2S45	4	2	0.45
C4L0S45	4	0	0.45	C6L2S15	6	2	0.15
C6L0S15	6	0	0.15	C6L2S30	6	2	0.3
C6L0S30	6	0	0.3	C6L2S45	6	2	0.45
C6L0S45	6	0	0.45				

注:水泥、石灰、SAP的质量分数指的是占湿土质量的百分数。试样编号由水泥(C)、石灰(L)和SAP(S)及其质量分数组成,如编号C2L2S30代表水泥质量分数为2%、石灰质量分数为2%、SAP质量分数为0.30%。

指标之一。对经过闷料、掺料之后的不同配比的无机结合料固化土重新进行风干晾晒,根据JTG E40—2007《公路土工试验规程》的要求,使用重型击实仪进行击实试验。

1.4 耐久性试验

由日晒雨淋等引发的干湿循环作用可能会导致固化土的工程性质发生变化。在干燥环境条件下,SAP材料会缓慢释放颗粒内部的存储水,使试样保持在一定的相对湿度^[27],SAP材料的变化可能会对固化土的耐久性产生影响。无机结合料固化土以及复合固化土的耐久性可以通过干湿循环试验进行研究,干湿循环试验也可以模拟现场路基的吸水-失水过程,由于水泥土干湿循环试验缺少相关规范^[28],因此参考《(ASTM)D588》的方法进行^[25]。将不同配比的无侧限抗压试样置于温度为(20±2)℃、湿度大于95%的养护箱中养护至28d进行试验。一次干湿循环为:将试样置于温度为45℃的烘箱24h,取出常温下放置1h,之后完全浸于20℃蒸馏水中5h,最后将试样置于20℃养护箱中24h。试样进行3次、5次、10次干湿循环后,取出观察并拍照记录,测试其无侧限抗压强度,同时取出一组标准养护对照组试样进行强度测试。

1.5 干缩变形试验

由于水泥基固化材料普遍具有干缩性能差的特点,对水泥固化土、水泥石灰固化土及其加入SAP材料之后复合固化土的干缩性能进行了测试。根据JTG E51—2009《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》对细粒土制样的要求制备试样(制作尺寸为50mm×50mm×200mm)。标准养护7d后进行浸水饱和,测定试样的初始长度后将其移至干缩箱(温度为(20±1)℃,相对湿度为60%±5%)。试样前7d,每日记录千分表读数,8d到30d每2d对千分表进行读数。

1.6 XRD 测试

为进一步了解SAP材料加固水泥固化土、水泥石灰固化土的作用机理,对水泥固化土、水泥石灰固化土及其掺入SAP材料的复合固化土养护至相应龄期的无侧限试样进行XRD试验。XRD试验分析采用布鲁克D8 advance衍射仪进行,对试验结果采用JADE进行半定性分析。

2 结果分析

2.1 SAP对无侧限抗压强度的影响

由图2可知,不同配比试样的抗压强度都随着养护时间的增加而增加。在2%、4%、6%水泥掺入量条件下,水泥SAP固化土28d无侧限抗压强

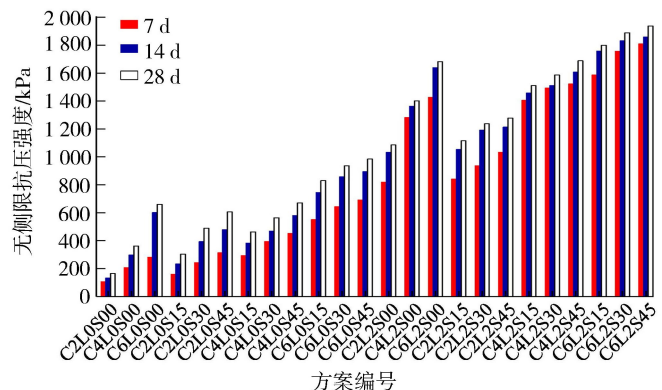


图 2 不同龄期下固化土无侧限抗压强度曲线

Fig. 2 Unconfined compressive strength curve of solidified soil at different ages

度比水泥固化土分别最大提高 267.7%、85.3%、49.2%;水泥石灰 SAP 固化土 28 d 无侧限抗压强度比水泥石灰固化土分别最大提高 80.0%、34.1%、14.6%。这是由于 SAP 材料具有高吸水性、高保水性,可以吸收在土体颗粒间的孔隙水并对土体孔隙进行填充,因此随着 SAP 材料的掺入,无机结合料固化土的无侧限抗压强度会有所提高。

从图 2 中也可以发现,水泥固化土的强度低于水泥石灰固化土的强度,这是因为水泥和石灰掺入后,钙离子浓度和土体的碱性环境增强,加速了水化产物的稳定和析出,从而加强了土颗粒之间的连接,使土体强度得以增强。掺入 SAP 材料之后水泥固化土的强度高于水泥石灰固化土的强度,这是由于在同等水泥、SAP 材料掺量的条件下,水泥石灰固化土中 SAP 材料的饱和率低于水泥固化土中的。将水泥固化土和水泥石灰固化土中的 SAP 材料取出后称重并置于标准养护箱中,在标准养护条件下养护 24 h 后取出称重,发现水泥固化土中 SAP 材料的质量并未发生明显变化,但水泥石灰固化土中的 SAP 材料会吸收部分养护环境中的水分,因此相同水泥、SAP 材料含量条件下,水泥固化土的强度结构形成更为完整,水泥石灰固化土的强度会低于水泥固化土,强度增长幅度也小于水泥固化土。

2.2 SAP 对固化土压实度的影响

由表 2 可知,水泥固化土与水泥石灰固化土在掺入 SAP 材料之后,最优含水率均有所增加,且随着 SAP 材料含量的增加而增大;而对于最大干密度而言,水泥+SAP 组随着 SAP 材料含量的增加而减小,水泥石灰组在掺了 SAP 材料后最大干密度会先增加继而随着 SAP 材料含量的增加而减小。最大干密度有所降低是因为 SAP 材料具有高吸水性,其达到饱和状态后呈凝胶状,使得土颗粒凝聚,对土颗粒空隙有填充作用,使得土颗粒间形成大的团聚体^[24],击实更加困难,且 SAP 材料的容重远小于水泥以及原状淤泥土,故最大干密度有所减小;最优含水率有所增加是因为 SAP 材料具有高吸水性、高保水性,掺入土体中会主动吸收土体中的水分因而复合固化土的最优含水率明显提高,有利于施工过程中减少晾晒处理时间。

为进一步明确掺入 SAP 材料对无机结合料固化土压实度的影响,对满足路基填筑要求、达到 94% 压实度时所对应的含水率进行了计算,计算结果显示对于水泥与水泥+SAP 组,随着 SAP 含量增加,对应的含水率逐渐增加,当 SAP 含量为 0.45% 时,含水率为 27.5%,相比单掺水泥,含水率增加了 6.2%;对于水泥+石灰与水泥石灰 SAP 固化土,随着 SAP 含量的增加,对应的含水率也逐渐增加,当 SAP 含量为 0.45% 时,水泥石灰 SAP 固化土的含水率为 30.8%,相比水泥+石灰组,含水率增加了 8.3%。即掺入 SAP 材料会使水泥固化土、水泥石灰固化土在工程施工过程中对含水率的控制更加容易。

2.3 SAP 对固化土耐久性的影响

由图 3(a)可知,水泥固化土、水泥石灰固化土质量损失量随着循环次数的增加整体呈上升状态,水泥石灰 SAP 固化土的质量损失量则随着循环次数的增加逐渐减小,第 6 次循环之后,水泥石灰 SAP 固化土的质量损失量仅为水泥固化土、水泥石灰固化土试样质量损失量的 4.7%~9.5%。由图 3(b)可知,水泥固化土的无侧限抗压强度呈下降趋势,最终强度为初始强度的 67.6%,水泥石灰 SAP 固化土的强度则有所增加,上升至初始强度的 120.8%。由图 3(b)可知,水泥石灰固化土的无侧限抗压强度先增加后减小,这是由于干湿循环试验在试样养护至 28 d 时开始,试样强度并未达到稳定状态,因此试样强度会有所增加,这也与徐国中等^[29]的试验结果相似。水泥石灰 SAP 固化土的强度也呈上升趋势,强度上升至初始强度的 124.0%。水泥石灰 SAP 固化土强度上升是由于 SAP 材料可使水泥石灰 SAP 固化土试样内部的含水率维持在一个较为平衡的状态,环境的稳定可以促进水泥水化,使得固化土的强度增加^[18-23]。

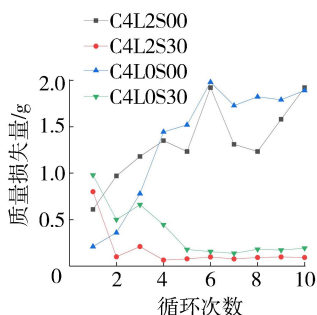
2.4 SAP 对固化土干缩性的影响

由表 3 可知,水泥固化土、水泥石灰固化土掺入 SAP 材料后的干缩应变明显降低,其中水泥固化土的最大干缩应变减少 32.6%,水泥石灰固化土的最大干缩应变减少 31.6%,且水泥石灰 SAP 固化土达到稳定状

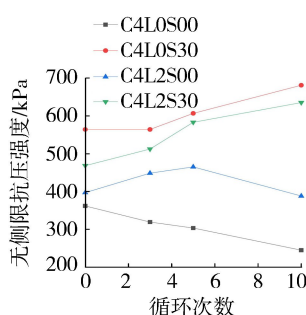
表 2 不同配比下最优含水率和最大干密度

Table 2 Optimum moisture content and maximum dry density under different ratios

方案编号	最优含水率/%	最大干密度/ (g·cm ⁻³)
C4L0S00	16.58	1.84
C4L0S00	16.90	1.87
C4L0S15	18.83	1.83
C4L0S30	18.91	1.81
C4L0S45	19.60	1.78
C4L2S00	17.36	1.74
C4L2S15	18.20	1.81
C4L2S30	19.13	1.76
C4L2S45	19.01	1.76



(a) 质量损失量随循环次数关系



(b) 无侧限抗压强度随循环次数的变化关系

图 3 质量损失量与无侧限抗压强度随循环次数的关系曲线

Fig. 3 Relationship curve between mass loss and UCS with cycle times

态(最大干缩应变)的时间会缩短。水泥石灰 SAP 固化土达到稳定状态(最大干缩应变)的时间则无明显变化。掺入 SAP 材料之后,水泥石灰 SAP 固化土的失水率要低于水泥固化土、水泥石灰固化土。这是由于在常温环境中,SAP 材料的持水能力要高于土体。

由图 4 可知,水泥固化土、水泥石灰固化土的干缩系数明显高于水泥石灰 SAP 固化土,即水泥石灰 SAP 固化土的干缩性能得到改善。综合对比干缩应变、失水率以及干缩系数的变化规律可以发现,加入 SAP 材料可以明显改善水泥固化土、水泥石灰固化土的干缩性能。

2.5 对无机结合料固化土的作用机理

为进一步明确 SAP 材料对水泥固化土、水泥石灰固化土的影响机理,对水泥固化土、水泥石灰固化土及其掺入 SAP 材料后的水泥石灰 SAP 固化土进行了 X 射线衍射测试,结果如图 5 所示。由图 5 可知,水泥石灰 SAP 固化土与常规无机结合料固化土的物质组成无明显区别,主要成分峰值并未发生明显变化,这说明 SAP 材料并未与水泥、石灰及土体产生直接化学反应,即 SAP 材料依靠对于水泥固化土的填充作用使得其强度增加。

表 3 不同组别干缩应变与失水率

Table 3 Dry shrinkage strain and water loss rate in different groups

组别	干缩应变	失水率/%
C4L0S00	0.007195	21.94
C4L0S30	0.004850	21.03
C4L2S00	0.007275	22.90
C4L2S30	0.004975	22.19

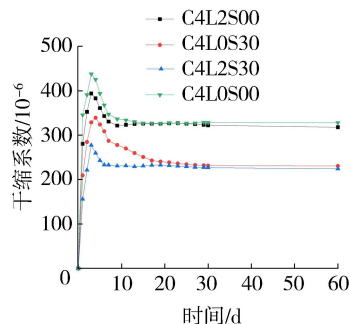
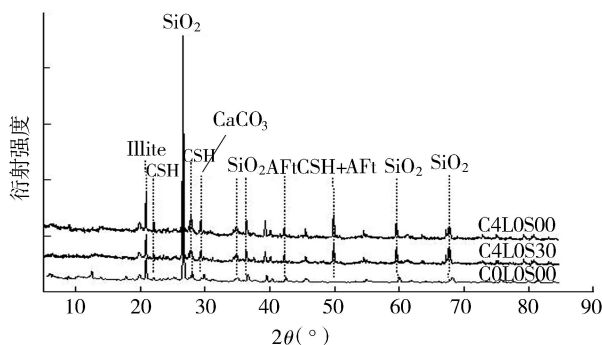
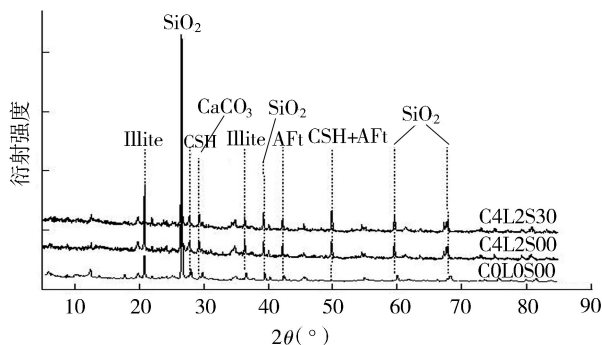


图 4 干缩系数随时间变化的关系曲线

Fig. 4 Relationship curve of drying shrinkage coefficient with time



(a) 水泥固化土



(b) 水泥石灰固化土

图 5 X 射线衍射图

Fig. 5 X-ray diffraction pattern

3 结 论

a. 掺入 SAP 材料之后,在水泥掺入量相同且其他条件相同的情况下,水泥固化土、水泥石灰固化土的无侧限抗压强度均得到了大幅度提高。

b. SAP 材料应用于无机结合料固化土,对无机结合料固化土的压实度、耐久性与干缩性指标都有明显改善。水泥固化土与水泥石灰固化土在掺入 SAP 材料之后,最优含水率均有所增加,且随着 SAP 含量的增加而增大;而对于最大干密度而言,水泥+SAP 组随着 SAP 含量的增加而减小,水泥石灰组在掺了 SAP 后最大干密度会先增加,继而随着 SAP 含量的增加而减小。满足 94% 压实度时所需达到的含水率随着 SAP 含量的增加而增加;干湿循环条件下水泥石灰 SAP 固化土的稳定性增强并且强度有所增加;水泥石灰 SAP 固化土的最大干缩应变相较于普通水泥固化土、水泥石灰固化土干缩应变显著降低。

c. SAP 材料应用于固化土,并与未固化土中的水泥、石灰以及土颗粒发生直接的化学反应,经过对比 XRD 的结果可以发现成分峰值并未发生明显变化,SAP 主要依靠填充作用来对固化土土体性质进行改性;在一定石灰含量的条件下,可对水泥石灰固化土的水化作用有一定的促进效果

参考文献:

- [1] 龚晓南. 地基处理技术及其发展[J]. 土木工程学报,1997,30(6):3-11. (GONG Xiaonan. Ground treatment technology and its development[J]. China Civil Engineering Journal 1997,30(6):3-11. (in Chinese))
- [2] 秦网根,蔡正银,关云飞,等. 不同地基处理方式下组合式板桩码头结构的受力变形分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2020,48(2):158-162. (QIN Wanggen, CAI Zhengyin, GUANG Yunfei, et al. Forced deformation analysis of combined sheet-pile wharf structure after different foundation treatments [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2020,48(2):158-162. (in Chinese))
- [3] 李沛,杨武,邓永锋,等. 土壤固化剂发展现状和趋势[J]. 路基工程,2014(3):1-8. (LI Pei, YANG Wu, DENG Yongfeng, et al. Status quo and trend of soil stabilizer development[J]. Subgrade Engineering,2014(3):1-8. (in Chinese))
- [4] 朱伟,赵笛,范惜辉,等. 渣土改良为流动化回填土的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(2):134-139. (ZHU Wei, ZHAO Di, FAN Xihui, et al. Research on application of residue soil-based flowable fill[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2021,49(2):134-139. (in Chinese))
- [5] HU L, FENG M, MA W. Feasible use of cement treated crushed waste clay brick aggregate as road subbase[J]. Energy Procedia, 2011(11):2442-2448.
- [6] LI L, ANNAN Z, YONGFENG D, et al. Strength performance of cement/slag-based stabilized soft clays[J]. Construction and Building Materials,2019,211:909-918.
- [7] YANKAI W, XIAOLONG Q, XINBAO Y, et al. Study on properties of expansive soil improved by steel slag powder and cement under freeze-thaw cycles[J]. KSCE Journal of Civil Engineering,2021,25(2):417-428.
- [8] 李凯,章定文,曹智国. 碳化作用对水泥固化/稳定化铅污染土渗透特性的影响[J]. 岩土工程学报,2019,41(增刊2):117-120. (LI Kai, ZHANG Dingwen, CAO Zhiguo. Effects of carbonation on permeability characteristics of cement-stabilized/solidified lead-contaminated soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2019,41(Sup2):117-120. (in Chinese))
- [9] 曹智国,章定文. 水泥土无侧限抗压强度表征参数研究[J]. 岩土工程学报,2015,34(增刊1):3446-3454. (CAO Zhiguo, ZHANG Dingwen. Key parameters controlling unconfined compressive strength of soil-cement mixtures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2015,34(Sup1):3446-3454. (in Chinese))
- [10] 黄新,周国钧. 水泥加固土硬化机理初探[J]. 岩土工程学报,1994,16(1):62-68. (HUANG Xin, ZHOU Guojun. Hardening mechanism of cement-stabilized soil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,1994,16(1):62-68. (in Chinese))
- [11] 王建华,高玉琴. 干湿循环过程导致水泥改良土强度衰减机理的研究[J]. 中国铁道科学,2006(5):23-27. (WANG Jianhua, GAO Yuqin. Study on the strength degradation mechanism of cement-soils resulting from dry-wet cycles [J]. China Railway Science,2006(5):23-27. (in Chinese))
- [12] VIRETTO A, GALY J. Development of biobased epoxy matrices for the preparation of green composite materials for civil engineering applications[J]. Macro Molecular Materials and Engineering,2018,303(5):1700521.
- [13] WANG Y, YANG K, TANG Z, et al. The Effectiveness of the consolidated desert surface by mixing of fly ash and polyacrylamide in wind erosion control[J]. Water, Air & Soil Pollution,2016,227(12):1-11.
- [14] RUOBING Z, ZHAOXIA Q, HAIXIA Q, et al. Frontal polymerization of superabsorbent nanocomposites based on montmorillonite and polyacrylic acid with enhanced soil properties[J]. Journal of Applied Polymer Science,2014,131(3):1082-1090.
- [15] GREEN V S, STOTT D E, GRAVEEL J G, et al. Stability analysis of soil aggregates treated with anionic polyacrylamides of different molecular formulations[J]. Soil Science,2004,169(8):573-581.
- [16] 刘瑾,施斌,顾凯,等. 聚氨酯型固沙剂改性土室内试验研究[J]. 防灾减灾工程学报,2013,33(1):29-34. (LIU Jin, SHI Bin, GU Kai, et al. Laboratory study on soil modified by polyurethane sand-fixing agents[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering,2013,33(1):29-34. (in Chinese))

- WANG Shitian. Division of buried depth of tunnel[J]. Chinese Journal of Geological Hazards and Prevention,2000(4):8-13. (in Chinese))
- [31] 陈林,葛坤龙,王涛. 基于盾构隧道环缝点云的中轴线提取方法[J]. 河海大学学报(自然科学版),2020,48(1):73-78. (CHEN Lin,GE Kunlong,WANG Tao. Central axis extraction method of shield tunnel based on ring seam point cloud[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2020,48(1):73-78. (in Chinese))
- [32] 涂鹏,陈寿根. 基于统计和塑性区的隧道深浅埋划分方法研究[J]. 地下空间与工程学报,2018,14(2):387-394. (TU Peng,CHEN Shougen. Study on division method of tunnel depth and shallow burial based on statistics and plastic zone[J]. Journal of Underground Space and Engineering,2018,14(2):387-394. (in Chinese))
- [33] 高峰,谭绪凯,肖刚. 隧道深浅埋限界定量划分方法研究[J]. 现代隧道技术,2018,55(增刊2):662-666. (GAO Feng,TAN Xukai,XIAO Gang. Study on quantitative division method of tunnel depth and shallow buried limit[J]. Modern Tunnel Technology,2018,55(Sup2):662-666. (in Chinese))
- [34] 甘磊,吴健,戴寿晔,等. 含施工裂缝隧道穿越段堤防渗流和稳定分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(1):85-90. (GAN Lei,WU Jian,DAI Shouye,et al. Seepage and stability analysis of embankment with construction cracks in tunnel crossing section[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2022,50(1):85-90. (in Chinese))

(收稿日期:2022-03-03 编辑:胡新宇)

(上接第104页)

- [17] 王银梅,杨重存,谌文武,等. 新型高分子材料 SH 加固黄土强度及机理探讨[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(14):2554-2559. (WANG Yinmei,YANG Zhongcun,CHEN Wenwu,et al. Strength characteristics and mechanism of loess solidified with new polymer material SH[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2005,24(14):2554-2559. (in Chinese))
- [18] DENG Y,LIU S,HUANG J,et al. Strength and permeability of cemented soil with PAM[C]//Proceedings of the Fourth International Conference on Grouting and Deep Mixing. Beijing:The Chinese Ceramic Society. 2012:1800-1807.
- [19] MIURA N,HORPIBULSUK S,NAGARAJ T S. Engineering behavior of cement stabilized clay at high water content[J]. Soils & Foundations,2008,41(5):33-45.
- [20] HORPIBULSUK S,NAGARAJ T S,MIURA N. Assessment of strength development in cement-admixed high water content clays with Abrams' law as a basis[J]. Géotechnique,2003,53(4):439-444.
- [21] HORPIBULSUK S,BERGADO D T,LORENZO G A. Compressibility of cement-admixed clays at high water content[J]. Geotechnique,2004,LI(2):151-154.
- [22] JIANHUI L,NIMA F,CAIJUN S. Effects of superabsorbent polymer on interfacial transition zone and mechanical properties of ultra-high performance concrete[J]. Construction and Building Materials,2020,231:117142.
- [23] HAITAO Y,JUANHONG L,QIAN Z,et al. The re-swelling behavior of superabsorbent polymers(SAPs) in hardened cement paste with an artificial crack[J]. Materials and Structures,2019,52(5):1-13.
- [24] XIA B,YUPENG C,ZHIFENG W,et al. Effect of super-absorbent polymer on the undrained shear behavior of cemented dredged clay with high water content[J]. Journal of Materials in Civil Engineering,2017,29(7):04017023.
- [25] 胡兴. 人工拌合盐酸和 Zn~(2+) 污染土的力学性能研究[D]. 武汉:湖北工业大学,2017.
- [26] 何叶丽. 高吸水性聚合物性能指标与测试方法[J]. 化工新型材料,1998(12):22-24. (HE Yeli. Performance index and test method of super absorbent polymer[J]. New Chemical Materials,1998(12):22-24. (in Chinese))
- [27] TESSIER A,CAMPBELL P,BISSON M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals[J]. Analytical Chemistry,1979,51(7):844-851.
- [28] 刘青云. PAM 与水泥复合改性青海风积沙的路用性能与应用研究[D]. 南京:东南大学,2019.
- [29] 徐国中,陈吉森. 干湿循环作用下滞洪区路基填料改良土特性试验研究[J]. 小水电,2014(2):16-18. (XU Guozhong,CHEN Jisen. Experimental study on characteristics of subgrade filler improved soil in flood detention area under dry wet cycle[J]. Small Hydro Power,2014(2):16-18. (in Chinese))

(收稿日期:2021-12-11 编辑:刘晓艳)