

DOI: 10.11779/CJGE202105013

不同物态配比碱渣-粉煤灰混合料强度特性

马加骁¹, 闫楠^{1,2}, 白晓宇^{1,2}, 张明义^{1,2}, 刘俊伟^{1,2}, 王永洪^{1,2}

(1. 青岛理工大学土木工程学院, 山东 青岛 266033; 2. 山东省高等学校蓝色经济区工程建设与安全协同创新中心, 山东 青岛 266033)

摘要: 为改善传统碱渣土填筑方法工艺复杂、耗时较长的缺点, 以山东海化集团的碱渣和粉煤灰为原材料, 对不同物态和配比的碱渣土进行了室外填筑试验, 并通过室内试验对液相填筑碱渣土的均匀性和强度进行改良。采用击实试验、轻型动力触探试验、便携式可变能量动力触探试验对现场填筑碱渣土的强度特性进行测试表征; 采用自制的沉淀器模拟液相碱渣土的一维固结沉降, 对液相填筑碱渣土的均匀性和强度进行改良和测试。结果表明, 碱渣与粉煤灰固体的最优质量配比为 7:3, 其最大干密度和最优含水率分别为 0.88 g/cm³, 64%。碱渣土液相填筑具有可行性, 且液相填筑碱渣土的土体强度及均匀性明显优于液相-固相填筑的碱渣土。液相填筑的碱渣土存在一定的分层现象, 电离子土壤固化剂能进一步提高土体均匀性, 其最优掺量为 0.019%。在碱渣土中掺入 7% 的石灰粉能有效激发粉煤灰活性, 大幅提高碱渣土的承载能力。试验结果可指导碱渣土的填筑施工, 进一步提高碱渣土的填筑效率和质量。

关键词: 碱渣; 粉煤灰; 填筑方法; 室外试验; 改良试验

中图分类号: TU442 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2021)05-0893-08

作者简介: 马加骁(1994—), 男, 硕士研究生, 主要从事地基基础等方面的科研工作。E-mail: majiaxiaol356@163.com。

Strength characteristics of soda residue-fly ash mixture with different proportions and phases

MA Jia-xiao¹, YAN Nan^{1,2}, BAI Xiao-yu^{1,2}, ZHANG Ming-yi^{1,2}, LIU Jun-wei^{1,2}, WANG Yong-hong^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266033, China; 2. Cooperative Innovation Center of Engineering Construction and Safety in Shandong Blue Economic Zone, Qingdao 266033, China)

Abstract: In order to correct the shortcomings of the traditional soda residue soil filling method, which is complicated and time-consuming, the outdoor filling tests are carried out on the soda residue soil with different material states and ratios using the soda residue and fly ash from Shandong Haihua Group as raw materials, and the uniformity and strength of the liquid phase filling soda residue soil are improved through laboratory tests. The strength characteristics of the site filled soda residue soil are measured by the compaction tests, light dynamic contact tests and portable variable energy dynamic contact tests. The uniformity and strength of liquid-filled soda residue soil are improved and tested by using the self-made precipitator. The results show that the optimal ratio of solid mass of soda residue to fly ash is 7:3, and the maximum dry density and optimal water content are 0.88 g/cm³ and 64%. It is feasible to fill the soda residue soil by liquid phase, and the strength and the uniformity of soil with liquid phase are obviously better than those with solid phase. There is a certain stratification of the liquid filled alkaline residua soil. The electrotonic soil stabilizer can further improve the uniformity of the soil, and the optimal dosage is 0.019%. Adding 7% lime powder into the soda residua soil can effectively stimulate the activity of fly ash and greatly improve the bearing capacity of the soda residua soil. The experimental results can be used to guide the construction of the soda residue soil and further improve its filling efficiency and quality.

Key words: soda residue; fly ash; filling method; outdoor test; improved test

0 引言

碱渣是氨碱法生产纯碱过程中排出的碱性废弃物, 又称白泥。随制碱工业的迅速发展, 中国每年排出碱渣近 300×10⁴ t, 大量的碱渣通过地表堆积或排入海洋的方法进行处理。由于碱渣的理化性质特殊, 不合理的处理方法不仅侵占土地资源, 而且会对周边生

态环境造成污染^[1-2]。

为减少废弃碱渣对生态环境的污染, 提高经济效

基金项目: 国家自然科学基金项目(51809146); 山东省重点研发计划项目(2018GSF117008)

收稿日期: 2020-07-06

*通信作者(E-mail: yannan0527@163.com)

益及利用率,碱渣的治理与再利用成为近年来的研究热点,各领域的学者进行了许多积极的探索。在建筑工程领域,将碱渣用于生产无熟料水泥、砌块、胶凝材料^[3];在农业方面,碱渣富含微量元素可生产植物复合肥,也可作为酸性土壤的改良剂;碱渣经处理后还可用作烟气的脱硫剂和染料污水的吸附剂等^[4]。但上述治理方法对碱渣的消耗量少且加工成本较高,不能从根本上解决碱渣大量堆积造成的污染问题。

将碱渣与粉煤灰等材料按一定比例拌和可制成碱渣土,作为工程土用于填垫工程,能够消耗大量的废弃碱渣,还能增加土地资源提高经济效益,是处理碱渣的一种有效途径。国内外众多学者对碱渣土的性质及填筑方法进行了深入研究,王芳等^[5]通过室内试验对碱渣的土工试验方法进行了探索,可为碱渣的室内试验方法提供参考,并对不同配比碱渣土的力学特性进行了研究。孙树林等^[6]将碱渣作为添加剂用于膨润土的改良,由室内试验结果可知碱渣改良膨润土具有可行性。赵献辉等^[7]将碱渣和粉煤灰拌和制得碱渣土,通过室内试验对不同龄期的碱渣土进行颗粒分析,证明碱渣和粉煤灰之间存在化学作用。冀国栋等^[8]通过X射线衍射和SEM电镜扫描等一系列室内试验,对碱渣和粉煤灰拌和后的强度增强机理进行了系统的研究,发现粉煤灰的掺入能够显著改善碱渣的力学性能,碱渣土的回填具有可行性。

众多学者以室内试验结果为参考和依据,通过现场试验对碱渣土填筑的可行性进行了探索。日本将碱渣制成碱渣土用于填海造地;张明义等^[9-10]通过现场填筑试验对不同配比碱渣土的力学性能进行了试验研究,并对碱渣土的不同填筑方法进行了探究;闫澍旺等^[11]将固体碱渣与固体粉煤灰拌和制得碱渣土,采用分层压实法回填,经试验检测所填筑碱渣土的工程性能较好;田学伟等^[12]以固体碱渣废料为主要原料制取碱渣土,进行了大面积的现场填垫试验,通过现场试验测得碱渣土具有一定的承载能力,可用做部分工程的地基土。但是,目前所采用的碱渣土填筑方法,在填垫前需对碱渣废液进行压滤或脱水处理,再将固体碱渣与粉煤灰等材料拌和后进行压实回填,此填筑方法耗时较长,不适用实际工程的大面积填筑。如果将碱厂排出的碱渣废液或碱渣固体配置的碱渣液,与粉煤灰按一定比例混合均匀后,直接用于碱渣土的填筑,能够省去液体碱渣压滤脱水所耗时间,显著提高碱渣土的填垫效率。

因此,以山东海化集团的碱渣废液和粉煤灰为研究对象,在室内试验的基础上,将碱渣废液与粉煤灰液直接混合进行室外液相填筑试验,对碱渣土的填筑质量进行了检测。为进一步提高填筑质量,基于室外

试验的结果进行了室内碱渣土均匀性和强度改良试验,以期为碱渣土的液相填筑提供一定的参考和依据。

1 试验材料

试验所用碱渣和粉煤灰取自山东海化碱厂和山东海化电厂,将碱渣和粉煤灰烘干、碾碎后进行化学成分分析,碱渣的化学成分:CaCO₃为51.22%,Mg(OH)₂为12.78%,NaCl为10.87%,CaSO₄为9.24%,Fe₂O₃为5.23%,CaCl₂为4.45%,CaO为2.10%;粉煤灰的化学成分:SiO₂为51.64%,Al₂O₃为25.17%,Fe₂O₃为13.24%,CaO为3.23%,MgO为2.51%,S为1.07%。

2 试验方法

2.1 碱渣土配合比试验

由于现场取回的碱渣含水率较大,先用烘箱进行低温烘干,烘干温度为38℃,再碾碎过筛,过筛细度为2mm。将碱渣和粉煤灰按固体质量比为5:5,6:4,7:3,8:2制备试样,试样制备完成后密封静置一昼夜,再采用标准电动击实仪对5种试样进行轻型击实试验。为探究不同配比碱渣土的无侧限抗压强度,上述每种配比制备3个试样,并且制备3个纯碱渣试样作对比,进行无侧限抗压强度试验,室内试验操作均按规范^[13]进行。

2.2 液相碱渣土现场填筑试验

以碱渣土室内试验为基础,选用碱渣与粉煤灰固体质量比7:3,8:2的配比,进行现场填筑试验。试验池T1为固体质量比7:3的碱渣废液和粉煤灰液混合吹填(液相-液相),T2为固体质量比8:2的碱渣废液和粉煤灰液混合吹填(液相-液相),T3为固体质量比7:3的碱渣废液和固体粉煤灰混合吹填(液相-固相)。填筑完成后,通过现场试验对碱渣土的填筑质量进行检测。其试验流程主要为:试验池的准备、吹填材料的制备、碱渣土吹填、填筑质量检测。现场试验流程图如图1所示。

(1) 试验池的准备。开挖3个尺寸均为10m×10m×2m(长×宽×深)的试验池用于碱渣土的吹填,分别为T1, T2, T3。为模拟碱渣土的一维竖向固结,池底不铺防渗薄膜,仅在试验池侧壁加铺防渗薄膜,再用砖铺砌于试验池的侧壁和池底。在试验池旁分别建1个尺寸为1.5m×2.0m×2.5m(长×宽×深)的粉煤灰池用于制备粉煤灰液,1个尺寸为1.5m×1.5m×2.5m(长×宽×深)的混合池用于制备碱渣和粉煤灰的混合液。

(2) 吹填材料的制备。由于试验场地临近碱厂,故将碱厂排出的碱渣废液通过管道直接输送至试验场地,作为试验所用的液体碱渣,经试验测得碱渣废液

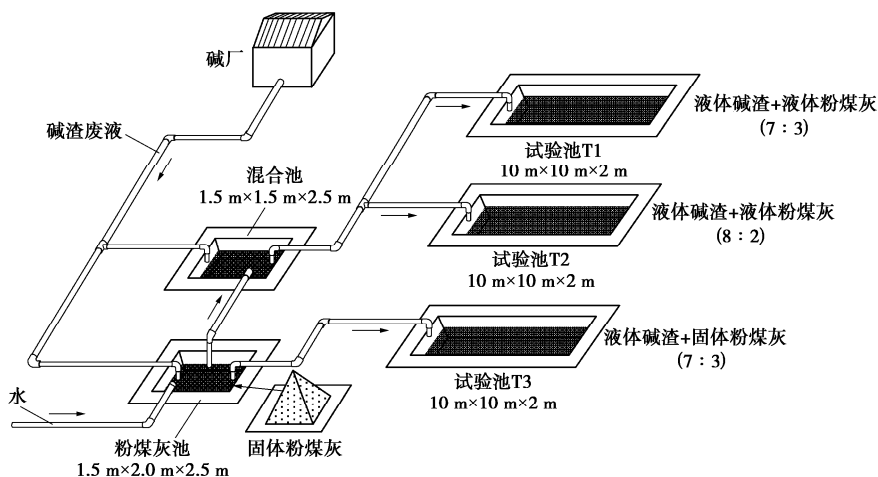


图 1 现场试验流程图

Fig. 1 Flow chart of field tests

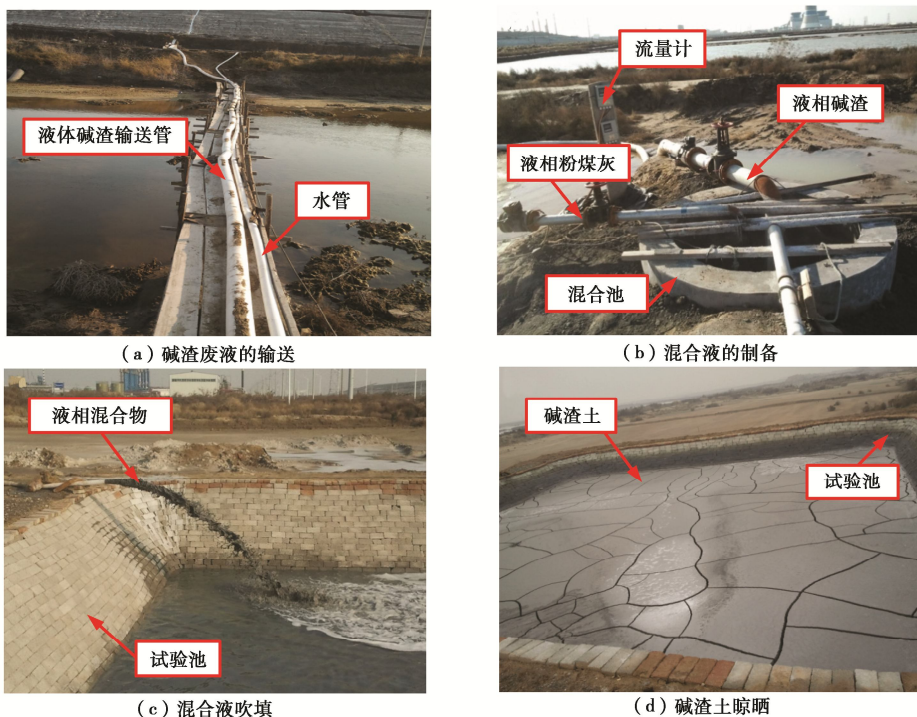


图 2 现场试验照片

Fig. 2 Photos of field tests

的密度为 0.08 g/mL, 如图 2 (a) 所示。粉煤灰液在粉煤灰池中制备, 先在粉煤灰池中注入 1.5 m 深的清水, 再将一定质量的固体粉煤灰加入粉煤灰池中, 采用搅拌器及泵回流对粉煤灰水进行搅拌, 得到一定浓度的粉煤灰液。

(3) 液相碱渣土吹填。将制备的粉煤灰液和碱渣废液通过料浆泵注入混合池中并搅拌均匀, 混合液的含固量及碱渣与粉煤灰的配比通过流量计进行控制, 如图 2 (b) 所示。先制备固体质量比为 7:3 的混合液, 将混合液注满 T1 试验池, 沉淀 4 h 后抽去上部清液, 再重新将混合液注满沉淀池, 直至碱渣土厚度达 1.0 m 时完成填筑, 如图 2 (c) 所示。T2 试验池的吹填方法与 T1 试验池相同。试验池 T3 的混合液由碱渣

废液与粉煤灰固体混合而成, 将碱渣废液直接注入粉煤灰池中, 同时加入一定质量的粉煤灰固体, 搅拌均匀后注入试验池 T3 中。

(4) 填筑质量检测。填筑结束 5 个月后, 试验池中的碱渣土经过风干晾晒表面硬化, 已具有一定的承载能力, 如图 2 (d) 所示。为检测 3 个试验池中碱渣土的强度及均匀性, 在每个试验池表面选取试验点, 按规范^[13]进行轻型动力触探试验和可变能量动力触探试验, 试验点分布如图 3 所示。

2.3 碱渣土均匀性改良试验

试验所用自制沉淀器由三轴试验的大尺寸饱和器、滤纸、透水石等构件组成, 用以模拟碱渣土混合液的一维竖向固结, 自制沉淀器结构如图 4 所示。配

制 2 份碱渣与粉煤灰固体质量比为 7:3、含固比为 20% 的混合液, 1 份中加入 0.019% (5 滴) 的电离子土壤固化剂 (ISS), 进行平行试验。根据规范^[14], 由于所用电离子土壤固化剂 (ISS) 为液体土壤固化剂, 其掺量采用固化剂与待稀释于拌和用水量之体积比表示, 固化剂的掺入体积通过滴管控制。将配制的试样注入到自制沉淀器内, 混合液的渗透速度通过透水石上的滤纸层数控制, 14 d 后混合液沉淀已基本完成, 打开沉淀器半模, 使用钢丝锯竖直切开沉淀物, 观察碱渣土剖面的均匀性状况。

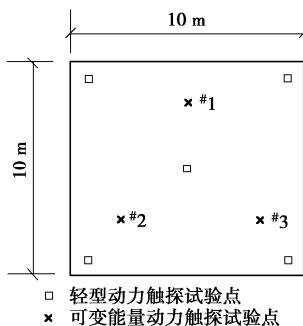


图 3 现场试验点分布平面图

Fig. 3 Distribution plan of field test site

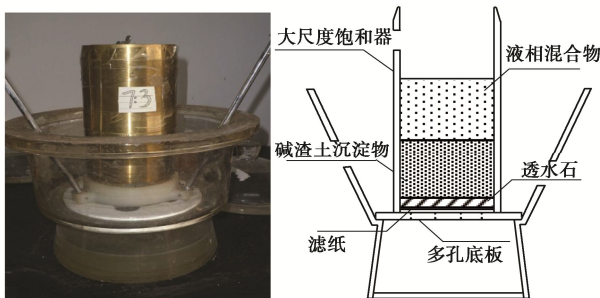


图 4 自制沉淀器结构图

Fig. 4 Structural diagram of self-made precipitator

根据规范^[14]和文献[15, 16], 土壤固化剂掺量宜根据固化剂的使用说明确定, 掺量过低或过高都会影响土壤固化剂的作用。因此, 为确定电离子土壤固化剂对碱渣土均匀性改良的最优掺量, 以及固化剂高掺量对碱渣土均匀性的影响, 同时考虑混合液配置的便捷性及经济性, 取 4 组试样, 在控制其它条件不变的情况下, 分别掺入 0.0075% (2 滴)、0.019% (5 滴)、0.030% (8 滴)、0.041% (11 滴) 的电离子固化剂再次进行沉淀试验。

2.4 碱渣土强度改良试验

试验所用石灰为生石灰, 首先通过滴定试验测得石灰的 CaO 和 MgO 的含量均值是 67.3%。由于石灰在凝结硬化过程中体积会收缩, 影响混合料的稳定性和力学性质, 且实际吹填工程面积较大, 较大的石灰掺量会大幅度提高成本, 因此综合考虑石灰的掺量不宜过多^[17]。根据参考文献[17, 18], 向纯碱渣中加入

1%, 3%, 5%, 7%, 9% 的石灰, 每个配比做两组平行试验, 按规范^[13]进行无侧限抗压强度试验。

为进一步探究石灰掺量, 对碱渣与粉煤灰固体质量比为 7:3 碱渣土强度的影响, 配制 4 份碱渣与粉煤灰固体质量比为 7:3 的混合液, 分别加入 3%, 5%, 7%, 9% 的石灰粉搅拌均匀。为加快试验进度, 待沉淀物上层清液渗漏完毕后, 采用烘箱对沉淀物进行低温烘干处理, 烘干温度为 38℃。再采用 WY-4 型贯入仪, 对烘干后的试样进行微型触探试验, 在每个试样取 3 个试点, 记录贯入 10 cm 时的锤击数。

3 结果与讨论

3.1 碱渣土最优配合比分析

由轻型击实试验可得, 不同配比碱渣土含水率与干密度的变化曲线, 如图 5 所示。由图 5 可知, 随碱渣掺量的增加, 碱渣土的最优含水率逐渐降低, 与张明义等^[9]通过击实试验所得结论一致。粉煤灰掺量对碱渣土最优含水率的影响较大, 这是因为粉煤灰中的 CaO 能够与碱渣中的水反应, 降低碱渣土的含水率, 粉煤灰的掺量增多, 对碱渣中水的消耗越高, 碱渣土的最优含水率越低。粉煤灰掺量对碱渣土最大干密度的影响较小, 赵献辉等^[19]、刘春原等^[20]同样通过击实试验证实了此现象。配比 5:5, 7:3 碱渣土的最大干密度略高于其余两种配比的碱渣土, 且 7:3 碱渣土的最优含水率较大, 由于在实际工程中碱渣土脱水困难, 耗时较长, 故最优含水率较大的碱渣土更适用于填垫工程。

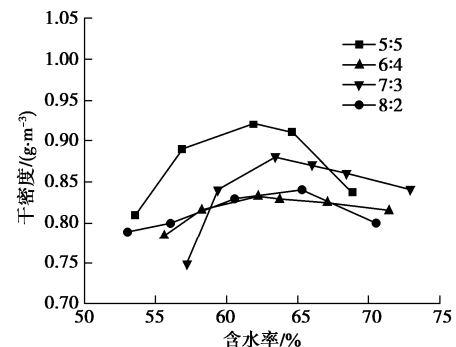


图 5 不同配比碱渣土含水率与干密度的变化曲线

Fig. 5 Curves of water content and dry density

不同配比间碱渣土的无侧限抗压强度如图 6 所示。与碱渣土相比纯碱渣的无侧限抗压强度较低, 配比为 8:2 碱渣土的无侧限抗压强度为纯碱渣的 6 倍, 粉煤灰的掺入能够明显提高碱渣的土体强度。这是因为粉煤灰的掺入能够降低碱渣的含水率, 提高土体中 Ca²⁺ 和 OH⁻ 的含量, 为碱渣土的重结晶作用提供了条件, 重结晶的结晶物填充在颗粒之间, 提高了土体强度, 反应如下^[20]。另一方面, 一定量的 CaSO₄ 和 OH⁻ 可激发粉煤灰的活性, 提高其胶凝性。但是这种激化作用有

一定限度, 故随粉煤灰掺量的增加, 无侧限抗压强度的增幅变小。

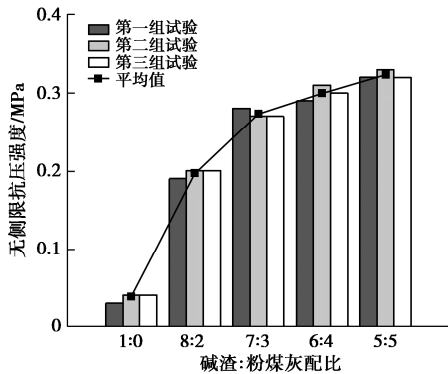
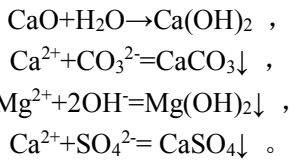


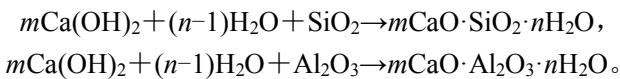
图 6 不同配比碱渣土的无侧限抗压强度

Fig. 6 Unconfined compressive strengths of soda residue soil with different ratios

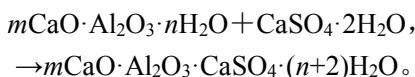
通过击实试验和无侧限抗压强度试验可知, 配比 7:3 碱渣土的最优含水率、最大干密度和无侧限抗压强度虽然不是最优的, 但在实际填筑工程中应综合考虑施工难度、成本和工期的影响。从本文试验结果可见, 配比 7:3 的碱渣土已具有较好的击实性和土体强度。且冀国栋等^[8]通过压缩试验发现, 当粉煤灰掺量为碱渣掺量的 40% 时, 碱渣土的固结压缩特性改善明显, 这一掺量也接近 7:3 的配合比。因此, 选定碱渣:粉煤灰为 7:3 为最优配合比^[21]。

3.2 液相吹填碱渣土填筑质量分析

由于碱渣土的固结不充分, 通过轻型触探试验结果可知^[13], 3 个沉淀池的触探击数均小于 5 击, T1 试验池的锤击数高于 T2 和 T3 试验池的锤击数。说明液相吹填碱渣土的强度高于液-固吹填碱渣土的强度, 且配比 7:3 的碱渣土强度较高, 这是因为粉煤灰中的 CaO 与碱渣中的 H₂O 相互作用生成 Ca(OH)₂, Ca(OH)₂ 与 SiO₂、Al₂O₃ 发生水化反应, 如下^[7]:



碱渣中的 CaSO₄ 可以与水化物发生反应如下:



液相吹填的碱渣土, 碱渣和粉煤灰之间的混合更为均匀, 上述反应更为充分, 生成水化硅酸钙、水化铝酸钙和水化硫铝酸钙较为均匀地填充在碱渣和粉煤灰颗粒之间, 胶结形成碱渣土体, 故液相吹填碱渣土的土体强度较高, 液相吹填具有可行性。

通过轻型动力触探试验检验其填筑质量存在一定

的局限性, 故采用便携式可变量动力触探仪对碱渣土进行可变量动力触探, 通过锥形探头的动力阻力检验碱渣土的密实度及均匀性。T1, T2, T3 试验池的触探阻力随深度变化曲线如图 7~9 所示。

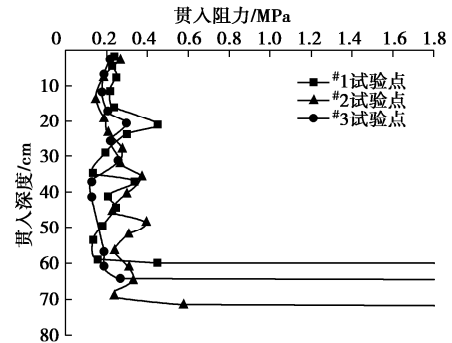


图 7 T1 试验池触探阻力随深度变化曲线

Fig. 7 Resistance curves of T1 test pool with depth

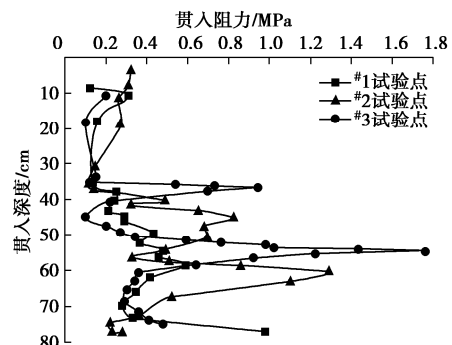


图 8 T2 试验池触探阻力随深度变化曲线

Fig. 8 The resistance curve of T2 test pool with depth

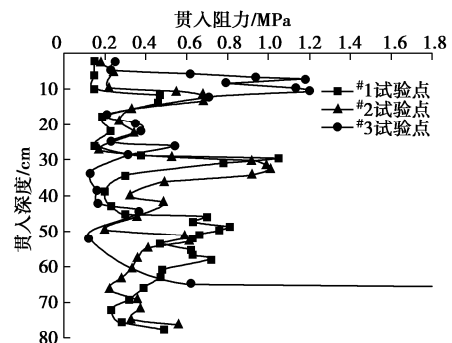


图 9 T3 试验池触探阻力随深度变化曲线

Fig. 9 Resistance curves of T3 test pool with depth

可见, 与 T3 试验池相比, T1, T2 试验池的触探阻力曲线随贯入深度的波动幅度较小, 说明 T1, T2 试验池的碱渣土硬度较为均匀, 采用液相填筑的碱渣土均匀性要明显优于直接掺入粉煤灰固体的碱渣土。与 T1 试验池相比, T2 试验池下部的触探阻力波动较大, 这是因为在 T2 试验池在吹填前期, 使用的为半湿粉煤灰。在制备液体粉煤灰时产生了块状的凝结物, 使大量的块状物沉淀在试验池下部。在吹填后期换用干燥粉煤灰, 此现象明显改善, 所以造成 T2 试验池下部的触探阻力曲线波动较大, 在制备粉煤灰液时应控制粉煤灰的含水率。从整体上看 T1, T2 试验池的

触探阻力在深度小于 30 cm 时的波动较小, 但随深度的增加其触探阻力整体上呈增大趋势且波动幅度逐渐变大, 这可能是由于碱渣废液和粉煤灰液的密度存在差异, 在沉淀过程中导致碱渣与粉煤灰颗粒间混合不充分, 易出现团聚现象, 从而导致一定程度的分层, 使土体强度及均匀性存在差异。冀国栋等^[8]通过室内试验对碱渣在液体中的沉降特性进行了研究, 同样证实碱渣在沉降过程中受颗粒的大小的影响, 导致不同深度碱渣的特性存在一定的差异, 下面将通过室内试验对此问题做进一步的验证与改良。

采用环刀取样法测得 T1 试验池碱渣土的含水率、干密度分别为 178.5%, 0.49 g/cm³, 与其最优含水率、最大干密度为 64%, 0.88 g/cm³ 存在一定的差距, 可见碱渣土的含水率较高, 承载力低, 且采用自然晾晒排水耗时较长, 导致吹填的场地无法立即投入使用产生经济价值。为了加快碱渣土的固结, 可用先采用浅层真空预压等浅表层地基预处理方法对表层碱渣土进行处理, 使大型机械能够进入吹填场地, 再采用深层真空预压、堆载预压或动力排水固结等方法进行二次处理, 以提高碱渣土的固结速度。

3.3 电离子土壤固化剂对碱渣土均匀性改良分析

图 10 为 ISS 对碱渣土均匀性改良的剖面图。可见, 两试样均存在一定的分层现象, 但加入固化剂的碱渣土分层现象明显改善, 均匀性较好。

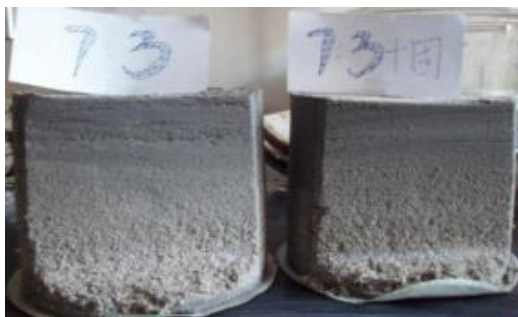


图 10 ISS 对碱渣土均匀性改良的剖面图

Fig. 10 Sectional view of soda residue soil with ISS

徐玉龙等^[22]通过自制沉降柱对碱渣的沉降机理进行了研究, 证实碱渣沉降类型受絮团尺寸的影响, 絮团尺寸较小的碱渣浆为均匀沉降。电离子土壤固化剂能够改变碱渣和粉煤灰颗粒表面的亲水性及负电性, 阻止其与阳离子构成双电层结构, 避免形成溶胶体, 从而使粉煤灰颗粒与碱渣颗粒的沉降更为均匀性^[15-16]。为确定土壤固化剂的最优掺量, 分别掺入 0.0075%, 0.019%, 0.030%, 0.041% 电离子固化剂的碱渣土剖面图如图 11 所示, 可见掺入 0.019% 固化剂试样的均匀性优于其余 3 个试样, 从经济性和均匀性改良多方面考虑, 在实际的碱渣土液相填筑工程中, 宜采用电离子土壤固化剂的掺量为 0.019%, 电离子土壤固化剂对碱渣土力学性质的影响, 有待进一步探究。

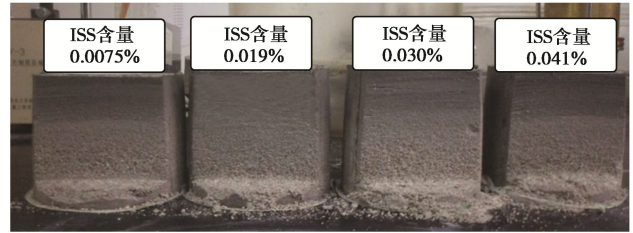


图 11 不同 ISS 掺量对碱渣土均匀性改良的剖面图

Fig. 11 Sectional view of uniformity of soda residue soil with different ISS contents

3.4 石灰对碱渣土强度改良分析

通过无侧限抗压强度试验, 可得不同石灰掺量碱渣的破坏形态如图 12 所示。可见, 当石灰掺量为 1% 和 3% 时, 碱渣土体呈现出竖向的贯通裂缝, 且在贯通裂缝周围存在小裂缝, 且土体存在一定的侧向鼓胀变形, 掉角和表皮剥落现象, 表明其抗压强度较低。当石灰掺量为 5% 时, 土体呈现出剪切破坏的特征, 土体侧向变形不明显, 且侧边出现劈裂和土样掉落的现象。随石灰掺量的继续增加, 土体的破坏裂缝变短, 侧边掉落土样较少, 表明土体的抗压强度提高。结合图 13 不同石灰掺量碱渣无侧限抗压强度, 对石灰的改良作用做进一步分析。

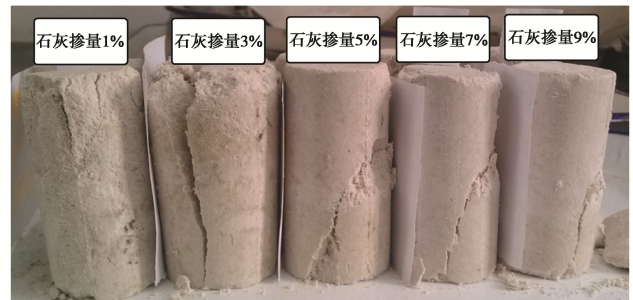


图 12 不同石灰掺量碱渣的破坏形态

Fig. 12 Destruction patterns of soda residue with different lime contents

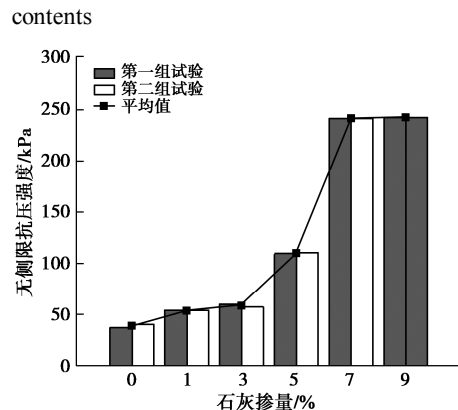


图 13 不同石灰掺量碱渣的无侧限抗压强度

Fig. 13 Unconfined compressive strengths of soda residue with different lime contents

随石灰掺量的增加, 碱渣的无侧限抗压强度提高, 当石灰掺量为 0~3% 时, 碱渣抗压强度的增幅较小, 当石灰掺量为 5% 和 7% 时, 碱渣的抗压强度迅速提高

至 110.37, 241.70 kPa。当石灰掺量提高至 9% 时, 碱渣的抗压强度为 242.55 kPa, 较掺量 7% 的抗压强度仅提高 0.85 kPa。这是因为, 在一定的石灰掺量范围内, 随石灰掺量的增加, 产生的胶凝物质越多, 土体强度越高。但当石灰掺量过多时, 产生大量的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶体会降低土颗粒之间的联结作用, 导致土体强度不仅不会持续增长, 甚至还会有所降低, 于爱民^[17]通过 SEM 电镜扫描试验证实了此观点。

石灰掺量与碱渣土贯入击数的关系如图 14 所示。可见, 随石灰掺量的增加, 碱渣土的贯入击数增加, 土体的承载能力提高。当石灰掺量在 3%~7% 时, 贯入击数增长迅速, 当石灰掺量达 7% 后, 贯入击数随石灰掺量的增加变化不大, 增幅仅为 1.8%, 与图 11 不同石灰掺量的碱渣无侧限抗压强度变化规律相似。石灰与碱渣中的水发生水化反应, 生成大量的 Ca^{2+} 和 OH^- , 随石灰掺量的增加, 土体 PH 值提高, 碱渣中溶解的硅酸盐和硅离子与 OH^- 反应生成 $\text{Si}(\text{OH})_3$, $\text{Si}(\text{OH})_3$ 与 Ca^{2+} 反应生成水化硅酸钙 (C-S-H)^[18]。且粉煤灰的主要成分为 SiO_2 , 在石灰改良碱渣土强度中起到火山灰的作用, 能够作为催化剂促进石灰发生反应, 提高碱渣土的土体强度^[7]。

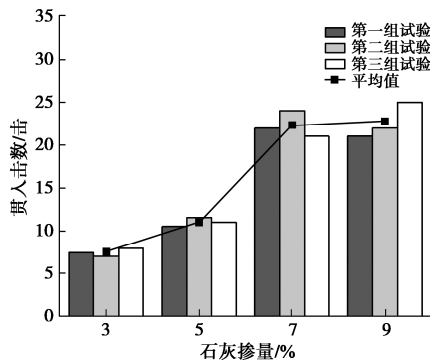


图 14 不同石灰掺量与碱渣土贯入击数的关系

Fig. 14 Penetration number of soda residue soil with lime content

由现场填筑试验可知, 在碱渣土液相填筑后, 碱渣土的含水率较高, 掺入一定量的石灰粉, 还能够消耗碱渣土中的水, 降低碱渣土的含水率, 提高碱渣土的土体的密实度。综上可知, 石灰对碱渣土强度的改良作用并不会随石灰掺量的增加而无限增长, 因此从经济、承载力等方面综合考虑, 石灰在碱渣土液相填筑时的最优掺量为 7%。

4 结 论

(1) 室内试验表明, 碱渣与粉煤灰固体质量的最优配比为 7:3, 此配比碱渣土的密实度及承载力较高, 且对碱渣的消耗量大, 有利于消耗大量的碱渣。

(2) 采用碱渣废液与粉煤灰液混合吹填制取的碱渣土, 其均匀性及承载能力明显优于直接掺入粉煤灰

固体的碱渣土。此方法填筑工艺简单、填筑质量较好, 且能大批量利用碱渣, 对于改进现有碱渣土的填筑方法, 指导碱渣土的填筑施工具有参考价值。

(3) 采用液相填筑碱渣土的整体均匀性较好, 但仍存在一定的分层现象, 掺入一定量的电离子土壤固化剂能提高液相填筑碱渣土的均匀性, 综合考虑成本及改良情况其最优掺量为 0.019%。固化剂对于碱渣土土体强度及排水固结的影响有待进一步研究。

(4) 石灰能激发粉煤灰活性, 在碱渣土液相填筑时掺入一定量的生石灰粉, 能有效提高碱渣土的土体强度及承载力, 综合考虑成本及改良情况其最优掺量为 7%。液相填筑的碱渣土结合固结排水措施, 能使碱渣土的强度及承载力进一步提高。

参考文献:

- [1] 赵礼兵, 许博, 李国峰, 等. 碱渣综合利用发展现状[J]. 化工矿物与加工, 2017, 46(6): 73 - 76. (ZHAO Li-bing, XU Bo, LI Guo-feng, et al. Development status in comprehensive utilization of alkaline residues[J]. Industrial Minerals & Processing, 2017, 46(6): 73 - 76. (in Chinese))
- [2] 杨久俊, 谢武, 张磊, 等. 粉煤灰-碱渣-水泥混合料砂浆的配制实验研究[J]. 硅酸盐通报, 2010, 29(5): 1211 - 1216. (YANG Jiu-jun, XIE Wu, ZHANG Lei, et al. Study on experimental preparation of cement mortar incorporating fly ash-soda residue[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2010, 29(5): 1211 - 1216. (in Chinese))
- [3] 侯贵华. 用碱渣烧制白色水泥[J]. 化工环保, 2003, 23(3): 161 - 164. (HOU Gui-hua. Preparation of white cement from soda residue[J]. Environmental Protection of Chemical Industry, 2003, 23(3): 161 - 164. (in Chinese))
- [4] 钱春香, 胡晓敏, 王鸿博, 等. 碱渣用作沥青混合料填料的可行性研究[J]. 公路交通科技, 2006, 23(4): 14 - 18. (QIAN Chun-xiang, HU Xiao-min, WANG Hong-bo, et al. Research on application of soda residue as filler in asphalt concrete[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2006, 23(4): 14 - 18. (in Chinese))
- [5] 王芳, 徐竹青, 严丽雪, 等. 碱渣土工试验方法及其工程土特性研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(8): 1211 - 1214. (WANG Fang, XU Zhu-qing, YAN Li-xue, et al. Study on test methods and geotechnical properties of soda residue[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(8): 1211 - 1214. (in Chinese))
- [6] 孙树林, 郑青海, 唐俊, 等. 碱渣改良膨胀土室内试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(6): 1608 - 1612. (SUN Shu-lin, ZHENG Qing-hai, TANG Jun, et al. Experimental research

- on expansive soil improved by soda residue[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, **33**(6): 1608 - 1612. (in Chinese))
- [7] 赵献辉, 刘春原, 王文静, 等. 路堤填垫用碱渣拌合土物理力学性能试验研究[J]. *硅酸盐通报*, 2017, **36**(4): 1406 - 1423. (ZHAO Xian-hui, LIU Chun-yuan, WANG Wen-jing, et al. Experimental research on physical and mechanical properties of soda residue mixing soils used for filling embankment[J]. *Bulletin of The Chinese Ceramic Society*, 2017, **36**(4): 1406 - 1423. (in Chinese))
- [8] 冀国栋, 杨春和, 刘伟, 等. 粉煤灰增强回填碱渣工程特性的试验研究[J]. *岩土力学*, 2015, **36**(8): 2169 - 2183. (JI Guo-dong, YANG Chun-he, LIU Wei, et al. An experimental study on the engineering properties of backfilled alkali wastes reinforced by fly ash[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, **36**(8): 2169 - 2183. (in Chinese))
- [9] 张明义, 周霞, 刘俊伟, 等. 碱渣资源化利用的工程性质试验研究[J]. *青岛理工大学学报*, 2008, **29**(4): 5 - 8. (ZHANG Ming-yi, ZHOU Xia, LIU Jun-wei, et al. Test studies of engineering performances of resource utilization of soda residue[J]. *Journal of Qingdao Technological University*, 2008, **29**(4): 5 - 8. (in Chinese))
- [10] 张明义, 周霞, 章伟, 等. 胶州湾娄山河口海域沉积白泥的回填造地研究[J]. *青岛理工大学学报*, 2008, **29**(5): 28 - 33. (ZHANG Ming-yi, ZHOU Xia, ZHANG Wei, et al. Study on treatment scheme of backfilling-for-land by soda residue deposited in sea area of Loushanhe Estuary[J]. *Journal of Qingdao Technological University*, 2008, **29**(5): 28 - 33. (in Chinese))
- [11] 闫澍旺, 侯晋芳, 刘润. 碱渣与粉煤灰拌合物的岩土工程及环境特性研究[J]. *岩土力学*, 2006, **27**(12): 2305 - 2308. (YAN Shu-wang, HOU Jin-fang, LIU Run. Research on geotechnical properties and environmental effect of mixture of soda waste and fly ash[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2006, **27**(12): 2305 - 2308. (in Chinese))
- [12] 田学伟, 李显忠. 唐山碱渣土的工程利用研究[J]. *建筑科学*, 2009, **25**(7): 77 - 79. (TIAN Xue-wei, LI Xian-zhong. Research on engineering utilization of soda residue soil in Tangshan[J]. *Building Science*, 2009, **25**(7): 77 - 79. (in Chinese))
- [13] 土工试验方法标准: GBT 50123—2019[S]. 2019. (Standard for Soil Test Method: GBT 50123—2019[S]. 2019. (in Chinese))
- [14] 土壤固化剂应用技术标准: CJJ/T 286—2018[S]. 2018. (Technical Standard for Application of Soil Stabilizer: CJJ/T 286—2018[S]. 2019. (in Chinese))
- [15] 刘清秉, 项伟, 张伟锋, 等. 离子土壤固化剂改性膨胀土的试验研究[J]. *岩土力学*, 2009, **30**(8): 2286 - 2290. (LIU Qing-bing, XIANG Wei, ZHANG Wei-feng, et al. Experimental study of ionic soil stabilizer-improves expansive soil[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, **30**(8): 2286 - 2290. (in Chinese))
- [16] 刘清秉, 项伟, 崔德山. 离子土固化剂对膨胀土结合水影响机制研究[J]. *岩土工程学报*, 2012, **34**(10): 1887 - 1895. (LIU Qing-bing, XIANG Wei, CUI De-shan. Effect of ionic soil stabilizer on bound water of expansive soils[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2012, **34**(10): 1887 - 1895. (in Chinese))
- [17] 于爱民. 石灰土微观结构研究[J]. *北方交通*, 2018(9): 49 - 54. (YU Ai-min. Study on microstructure of lime soil[J]. *Northern Communications*, 2018(9): 49 - 54. (in Chinese))
- [18] 朱志铎, 刘松玉, 孙海军. 江苏徐宿地区粉土的基本特性及加固方法研究[J]. *岩土力学*, 2004, **25**(7): 1155 - 1158. (ZHU Zhi-duo, LIU Song-yu, SUN Hai-jun. Study of stabilized silt in Xu-Su area[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2004, **25**(7): 1155 - 1158. (in Chinese))
- [19] 赵献辉, 刘春原, 朱琴, 等. 粉煤灰改性碱渣土的胶结特性与冻融机制[J]. *深圳大学学报(理工版)*, 2018, **35**(1): 48 - 54. (ZHAO Xian-hui, LIU Chun-yuan, ZHU Qin, et al. Cementation characteristics and freeze-thaw mechanism of fly ash-modified soda residue soils[J]. *Journal of Shenzhen University(Science and Engineering)*, 2018, **35**(1): 48 - 54. (in Chinese))
- [20] 刘春原, 胡磊, 朱琴, 等. 粉煤灰增强碱渣填垫性能的试验研究[J]. *河北工业大学学报*, 2018, **47**(5): 87 - 93. (LIU Chun-yuan, HU Lei, ZHU Qin, et al. Experimental study on performance of fly ash reinforced soda residue padding pad[J]. *Journal of Hebei University of Technology*, 2018, **47**(5): 87 - 93. (in Chinese))
- [21] 寇海磊, 俞峰, 张明义, 等. 碱渣-粉煤灰液相吹填混合料试验研究[J]. *建筑结构*, 2016, **46**(2): 96 - 99. (KOU Hai-lei, YU Feng, ZHANG Ming-yi, et al. Experimental study on the liquid-pumping filling mixture with soda waste and fly ash[J]. *Building Structure*, 2016, **46**(2): 96 - 99. (in Chinese))
- [22] 徐玉龙, 杨春和, 陈锋, 等. 碱渣回填地下废弃盐腔室内一维沉降试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2014, **36**(3): 589 - 596. (XU Yu-long, YANG Chun-he, CHEN Feng, et al. Experimental study on one-dimensional settlement of alkali wastes backfilled to abandoned salt caverns[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2014, **36**(3): 589 - 596. (in Chinese))