

三元协同固化土的力学性质研究

李伟 孙华召

沈阳建筑大学

DOI:10.12238/bd.v9i1.4323

[摘要] 以工业固废拜耳法赤泥(RM)、电石渣(CCS)、脱硫石膏(DG)协同制备固化剂并对粉质黏土进行改良。首先,探究不同固化剂掺量对粉质黏土的力学性能影响规律,确定固化剂的掺量影响;随后,探究固化剂固化土的耐久性能。试验结果表明:固化剂掺量为25%时,对粉质黏土的固化效果较好,其7d、28d抗压强度分别达到了1.6MPa、2.16MPa;经过5次干湿循环和冻融循环后,RDC25固化土强度损失分别为29.95%和42.26%。研究表明:拜耳法赤泥的潜在活性主要来源于氧化铝和氧化硅,通过电石渣的补钙和脱硫石膏的硫酸盐激发作用,赤泥的活性得以激发,其水化产物主要为水化硅酸钙(C-S-H)、水化铝酸钙(C-A-H)、钙矾石(Aft),三者胶结、填充土壤的内部空隙,使土的结构更加密实,进而力学性能得到提高。

[关键词] 拜耳法赤泥; 力学性能; 耐久性能; 微观固化机理

中图分类号: TQ175.1+5 **文献标识码:** A

Study on the mechanical properties of ternary synergistic solidified soil

Wei Li Huazhao Sun

Shenyang Jianzhu University

[Abstract] The industrial solid waste Bayer red mud (RM), carbide slag (CCS) and desulfurization gypsum (DG) were used to prepare the curing agent and improve the silty clay. Firstly, the influence of different curing agent content on the mechanical properties of silty clay is explored, and the influence of curing agent content is determined. Subsequently, the durability of solidified soil was explored. The test results show that when the content of curing agent is 25%, the curing effect of silty clay is better, and the compressive strength of 7d and 28d reaches 1.6 MPa and 2.16 MPa respectively. After 5 times of dry-wet cycles and freeze-thaw cycles, the strength loss of RDC25 solidified soil was 29.95% and 42.26%, respectively. The results show that the potential activity of Bayer red mud mainly comes from alumina and silicon oxide. Through the calcium supplement of carbide slag and the sulfate excitation of desulfurization gypsum, the activity of red mud is stimulated. The hydration products are mainly hydrated calcium silicate (C-S-H), hydrated calcium aluminate (C-A-H) and ettringite (Aft). The three cement and fill the internal voids of the soil, so that the structure of the soil is more compact, and the mechanical properties are improved.

[Key words] Bayer red mud; Mechanical properties; Durability; Micro curing mechanism

引言

粉质黏土在我国广泛分布,具有强度低、压缩性大、水稳性差等特点^[1]。将粉质黏土作为路基填土时容易引起路面开裂、沉降等灾害^[2]。为实现粉质黏土的工程应用,普遍利用固化剂对其进行改良后作为地基填充或路基铺设使用^[3]。目前常用的固化剂以水泥为主,但水泥在生产过程中高能耗和高碳排放等环境问题,不符合国家推动形成绿色低碳的生产方式和生活方式^[4]。据了解,我国已经迈入了工业大国行列,每年大宗工业固废新增及历史堆存量,对生态环境造成了严重的破坏^[5]。目前我国固废综

合利用比较单一,为提高多元固废协同利用,众学者响应国家“十四五”政策号召研究大宗工业固废固化土的资源化利用问题^[6]。李丽华等^[7]使用赤泥-石灰作为固化剂,探究了对重金属污染土固化效果,发现少量污染物会提高土体的抗压强度。Wan Xing^[8]等利用拜耳法赤泥和磷石膏在不同含水量和水泥掺量下稳定疏浚土,研究表明赤泥和磷石膏配比为3:1时,对水泥基疏浚土的改善效果较好。

在已有研究基础上,本研究提出以拜耳法赤泥、电石渣和脱硫石膏为原料,利用固废具有存量大、价格低廉等优点,开发多

元固废协同固化剂粉质黏土,作为新型路基填筑材料,不但能缓解固废的堆存压力、实现固废的大规模资源化利用,而且能节约大量土石方资源,同时也符合国家可持续发展的基本方针。

1 试验材料与方案

1.1 试验材料

试验用土取自校内建筑施工挖出的废弃土。试验土外观形态呈灰黑色,按照《土工试验方法标准》(GB/T50123-2019)测试其基本物理指标。按照《土的分类标准》(GBJ145-90),试验土为粉质黏土。试验所用的拜耳法赤泥、电石渣、脱硫石膏以及水泥材料分别来自灵寿亿鑫矿产品加工厂、杰威环保材料、山东潍坊某电厂等。

1.2 试验方案

1.2.1 固化剂RDC掺量方案

在固化剂RDC的配合比基础上,探究固化剂RDC不同掺量(15%、20%、25%、30%、35%)(与干土质量的比值)对粉质粘土进行固化,并以水泥掺量8%、10%为对照组。通过击实试验确定固化剂RDC不同掺量和水泥不同掺量固化土的最优含水率和最大干密度,并进行试件的制作。探究固化剂RDC不同掺量和水泥不同掺量固化土的力学性能影响。

1.2.2 耐久性试验

为深入探究RDC固化剂在土体固化中的应用效果,一场严谨的试验有序开展。研究人员选用特定的土体,将RDC固化剂分别按照25%和35%的掺量与土体充分搅拌混合,制成相应的固化土试件。为了科学评估RDC固化剂固化土的性能,本次试验设置了对照组,以在工程中常用的水泥作为参照。将水泥分别按照8%和10%的掺量与同样的土体混合,制成水泥固化土试件。后续对这两类试件同步开展水稳定性和耐久性试验,通过对比分析试验数据,全面评估RDC固化剂固化土的耐久性。

2 试验结果及分析

2.1 击实试验

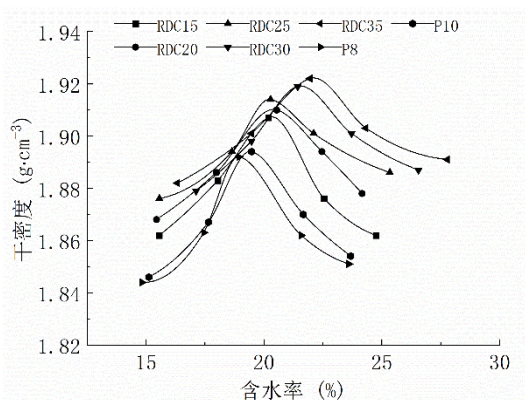


图1 原材料颗粒级配曲线

由图1可知,随着RDC固化剂掺量增加,曲线整体有向更高干密度移动的趋势,说明适当增加RDC固化剂掺量,有助于提高固化土干密度。P8和P10曲线与RDC固化剂曲线有交叉。在部分含水率区间,水泥固化土干密度高于RDC固化土;而在另一部分区

间则相反。这表明在不同含水率条件下,两者固化效果各有优势,实际应用中需依据具体含水率选择。

2.2 抗压强度试验

由图2可知,固化剂掺量的改变对固化土抗压强度有着极为明显的影响。在掺量处于15%至25%这个范围时,抗压强度会随着固化剂掺量的增加而呈现出显著的上升趋势。以7d抗压强度为例,从15%的掺量提升至25%的过程中,其强度提升效果十分突出。这主要是因为RDC固化剂各组成成分之间会发生水化反应,生成诸如水化硅酸钙(C-S-H)、水化硅铝酸钙(C-A-H)以及钙矾石(Aft)等胶凝物质。这些产物能够填充土颗粒之间的空隙,并将土颗粒胶结在一起,使得土体结构更加紧密、密实,进而有效地增强了固化土的抗压强度。然而,当固化剂掺量超过25%并继续增加时,抗压强度的提升幅度开始变小,逐渐趋于平缓。这可能是由于过量的固化剂打破了土体原本相对稳定的结构状态,使得部分水化产物难以充分发挥其应有的作用,无法像低掺量时那样有效地提升土体强度,最终导致强度提升受到限制。

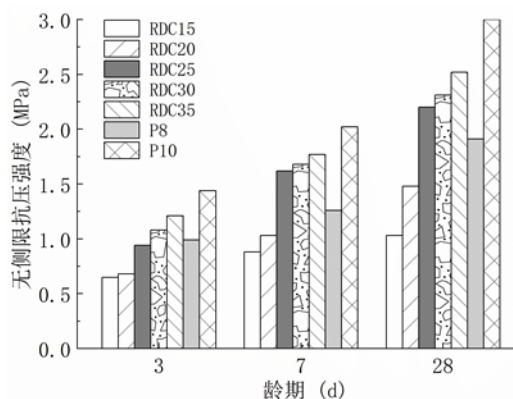


图2 不同RDC掺量下固化土的效果

2.3 干湿循环试验

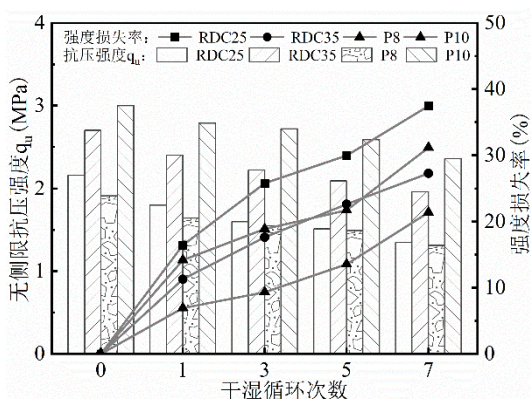


图3 干湿循环强度损失

图3清晰呈现了固化土的无侧限抗压强度损失率伴随干湿循环次数增加的变化趋势。从该图中可以获取详细信息,当采用RDC固化剂且其掺量分别设定为25%与35%时,历经5次干湿循环后,对应的强度损失率分别达到了29.95%和22.62%。进一步对比不同固化体系,RDC固化剂掺量为35%(即RDC35组)的固化土,其

强度损失率与水泥掺量为8%(P8组)的固化土强度损失率处于相近水平;而RDC固化剂掺量为25%(RDC25组)的固化土,强度损失率则高于P8组固化土。整体而言,相较于水泥固化土,RDC固化剂固化土在干湿循环过程中的强度损失率相对较高。在标准状态下,RDC25和RDC35固化效果处于水泥掺量8%和10%的固化效果区间之内。这一结果直观表明,RDC固化剂固化土在抵抗干湿循环的性能方面弱于10%水泥固化土。

2.4 冻融循环试验

在研究固化土性能的实验里,图4呈现固化土无侧限抗压强度以及强度损失率随冻融循环次数增加而变化的关键图表。从图3中,我们能够清晰洞察固化土在冻融环境下的性能演变趋势。实验数据表明,无论是采用RDC固化剂的固化土,还是以水泥为固化材料的固化土,其强度都会随着冻融循环次数的增多而持续下降。当RDC固化剂的掺量分别为25%和35%时,经过5次冻融循环后,强度损失率分别达到了42.26%和34.62%。而对于水泥固化土,当水泥掺量为8%和10%时,历经5次冻融循环后,强度损失率分别为36.82%和27.35%。通过这些具体数据的对比,显而易见,RDC固化剂固化土在冻融循环过程中的强度损失率要高于10%水泥固化土。

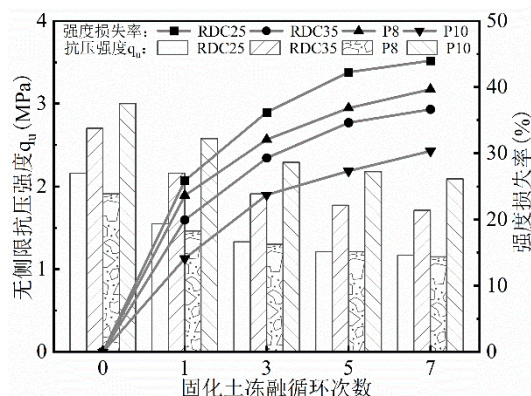


图4 冻融循环强度损失

3 结论

本研究利用拜耳法赤泥、电石渣和脱硫石膏制备固化剂改良粉质黏土,得到如下结论:

(1)在固化剂掺量影响方面,固化剂RDC掺量对粉质黏土固化效果影响显著。适当增加掺量有助于提高固化土干密度,在15%~25%范围内,固化土抗压强度随掺量增加而显著上升,25%掺量时7d、28d抗压强度分别达1.6MPa、2.16MPa,但超过25%后强

度提升变缓。综合来看,25%的固化剂掺量对粉质黏土固化效果较好。

(2)在耐久性能方面,RDC固化剂固化土在干湿循环和冻融循环下强度损失率均高于10%水泥固化土。经5次干湿循环后,RDC25和RDC35固化土强度损失率分别为29.95%和22.62%;5次冻融循环后,对应强度损失率为42.26%和34.62%。这表明其抵抗干湿循环和冻融循环的性能较弱。

(3)拜耳法赤泥在电石渣和脱硫石膏作用下,活性被激发,水化生成的C-S-H、C-A-H和Aft填充、胶结土颗粒,提升了土体力学性能。总体而言,该固化剂虽有一定改良效果,但耐久性有待进一步提升,后续可研究优化配比或添加辅助材料来增强其耐久性能。

[参考文献]

- [1]汪锦东,罗梦婷,鹿庆蕊,等.干湿循环下稻草秸秆-聚乙烯醇增强粉质黏土强度特性与微观机理[J].Bulletin of the Chinese Ceramic Society,2024,43(7):2630-2639.
- [2]陈锐,郝若愚,李笛.碱激发材料固化低液限粉黏土路用性能及抗冻融特性研究[J].工程地质学报,2022,30(2):327-337.
- [3]Chen M,WuD,Chen K,et al.The influence of fly ash-based geopolymer on the mechanical properties of OPC-solidified soil[J].Construction and Building Materials,2024,432:136591.
- [4]易文杰,李庄,罗竹燕,等.水泥行业环境影响评价低碳技术选择与应用[J].环境工程技术学报,2022,12(6):1905-1914.
- [5]王兆龙,姚沛帆,张西华,等.典型大宗工业固体废物产生现状分析及产生量预测[J].环境工程学报,2022,16(3):746-751.
- [6]Guo X,Zeng M,Yu H,et al.Critical review for the potential analysis of material utilization from inorganic industrial solid waste[J].Journal of Cleaner Production,2024:142457.
- [7]李丽华,毛望,裴尧尧,等.酸性干湿循环下赤泥-石灰固化镉铅污染土性能[J].有色金属工程,2024,14(5):135-142.
- [8]Wan X,Ding J,Mou C,et al.Role of Bayer red mud and phosphogypsum in cement-stabilized dredged soil with different water and cement contents[J].Construction and Building Materials,2024,418:135396.

作者简介:

李伟(1968—),男,蒙古族,辽宁朝阳人,三级教授,博士,主要从事地基处理、岩土数值分析等方面研究。