

高压旋喷止水帷幕复合固化剂性能分析

陈鲁川¹, 李宜欣², 王鹏程¹, 蒋红光^{2*}, 姚占勇², 王旭²

¹山东高速集团有限公司, 山东 济南

²山东大学齐鲁交通学院, 山东 济南

Email: *hongguang_jiang@sdu.edu.cn

收稿日期: 2020年9月1日; 录用日期: 2020年9月16日; 发布日期: 2020年9月23日

摘要

工业生产排放的各类固体废弃物具有潜在活性, 与水泥复配后可有效改善固化剂的多种性能。本文基于由固废材料研发的环保型高压旋喷止水帷幕固化剂, 通过室内试验, 评价了材料的施工性能、力学性能、抗渗性能等指标。研究发现固化剂的浆液比重、混合泥浆流动度与含水率具有明显的线性相关关系。复合固化剂的混合泥浆稳定性明显优于水泥, 离析率比水泥泥浆低2%~5%。随着含水率的提高, 混合泥浆的稳定性逐渐降低。复合固化剂固化土具有明显的早强特性、抗折特性与高初始含水率适用性。复合固化剂固化土的抗渗性能在45%初始含水率条件下与水泥土接近, 而在含水率高达55%时优于水泥土。

关键词

止水帷幕, 工业固废, 复合固化剂, 性能分析

Performance Analysis of Composite Curing Agent for High-Pressure Rotary Jet Waterproof Curtain

Luchuan Chen¹, Yixin Li², Pengcheng Wang¹, Hongguang Jiang^{2*}, Zhanyong Yao², Xu Wang²

¹Shandong Hi-Speed Group, Jinan Shandong

²School of Qilu Transportation, Shandong University, Jinan Shandong

Email: *hongguang_jiang@sdu.edu.cn

Received: Sep. 1st, 2020; accepted: Sep. 16th, 2020; published: Sep. 23rd, 2020

Abstract

Various types of solid waste discharged from industrial production have potential activity, and can effectively improve some properties of the curing agent after being compounded with cement.

*通讯作者。

文章引用: 陈鲁川, 李宜欣, 王鹏程, 蒋红光, 姚占勇, 王旭. 高压旋喷止水帷幕复合固化剂性能分析[J]. 土木工程, 2020, 9(9): 950-958. DOI: 10.12677/hjce.2020.99099

Based on the environmentally friendly high-pressure rotary jet waterproof curtain curing agent developed by solid waste materials, this paper evaluates the construction performance, mechanical performance, impermeability and other indicators of the material through laboratory tests. It found that the slurry specific gravity of the curing agent and the fluidity of the mixed mud both have an obvious linear correlation with the water content. The stability of the mixed slurry of the composite curing agent is obviously better than that of the cement. The segregation rate is 2% - 5% lower than that of the cement slurry. As the moisture content increases, the stability of the mixed mud gradually decreases. Composite curing agent solidified soil has obvious early-strength properties, flexural properties and applicability of high initial moisture content. The impermeability of soil cured by composite curing agent is close to that of cement soil under the condition of 45% initial water content. But it is better when the water content is up to 55%.

Keywords

Waterproof Curtain, Industrial Solid Wastes, Composite Hardeners, Performance Analysis

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

高压旋喷止水帷幕因施工快速、适用性强被广泛应用于土石坝、深基坑等防渗工程。但是，当前高压旋喷止水帷幕工程存在成本过高、工程质量可靠性差以及资源浪费严重等缺点。同时，多种工业固体废弃物具有潜在活性，采用固废材料研发经济、可靠的复合固化材料成为当前解决上述工程问题的有效途径。

高压旋喷止水帷幕固结体为水泥土，不同施工工艺的含水率差异很大。国内外学者对不同固废材料、浆液含水率条件的掺配效果进行了探索和研究。固废材料在水泥土中的应用方面，蒙强等[1]采用粉煤灰作为水泥掺合料加固饱和软黏土，结果表明其加固效果良好，但粉煤灰与水泥掺量的比例不宜超过 1:1。董玉萍等[2]研究发现，高钙粉煤灰对水泥土的早期强度影响较小，通过添加化学激发剂可有效激发高钙粉煤灰的活性，使其早期强度提高。崔靖俞等[3]通过渗透试验，发现粉煤灰可提高水泥土的长期抗渗性能。梁仕华等[4]认为粉煤灰可提高水泥土的结构致密性，提高水泥土的无侧限抗压强度、内摩擦角与粘聚力。脱硫石膏主要成分为硫酸盐，对于水泥具有早强与缓凝的双重作用，在水泥土中主要被作为激发剂应用。黄新等[5][6]采用 SEM 电镜扫描分析了水泥与废石膏加固软土的微观结构，结果表明水泥水化作用产生的水化硅酸钙附着于土颗粒孔隙壁上，对土体孔隙的填充效果有限，而加入废石膏后，石膏与水泥反应生成的钙矾石可显著降低土的孔隙率。霍曼琳等[7]进行了石膏外加剂改良高压旋喷桩的现场试验研究，2%掺量的脱硫石膏对于提高桩体强度与成桩质量效果显著。Papageorgiou A 等[8]采用脱硫石膏激发水泥，认为脱硫石膏的掺量不宜高于 10%，否则会引起水泥性能的衰减。Tzouvalas G 等[9]认为脱硫石膏具有良好的缓凝作用，但会影响材料的抗压强度。米栋云[10]研究了赤泥的掺入对水泥土力学特性与渗透特性的影响，结果表明在水泥土中掺加部分赤泥可提高水泥土的无侧限抗压强度，渗透系数也明显降低。陈金辉[11]结合 XRD 试验、SEM 试验与压汞试验分析了镍渣水泥土的固化机理，指出镍渣可以改善水泥土的孔隙特性。柯开展[12]认为水泥土的无侧限抗压强度随镍渣掺量的增加而降低，特别是早期强度下降明显，28d 后水泥土强度下降幅度才逐渐减小。

多种固废材料与水泥复配固化剂方面，庞文台等[13]认为单掺粉煤灰对水泥土的抗渗性能影响很小，加入石灰可以激发粉煤灰的火山灰作用，抗渗性能提高 50%以上。王贤昆等[14]采用脱硫石膏与粉煤灰

对水泥土进行复合改性, 结果表明脱硫石膏与粉煤灰对水泥土 3 d 强度基本无影响, 28 d 前脱硫石膏对水泥土强度的影响高于粉煤灰, 28 d 后粉煤灰影响更显著。Telesca 等[15]采用脱硫石膏、氢氧化钙与粉煤灰配置了新型胶凝材料, 分析了其水化过程中的物相组成。Poon 等[16]采用脱硫石膏激发粉煤灰的活性, 用于危险固废的固化处理, 取得了良好的效果。

可见, 相关研究主要集中在力学性能上, 对固废材料复合固化剂的施工性能与抗渗性能研究较少。本文基于由固废材料研发的环保型高压旋喷止水帷幕固化剂, 通过室内试验, 评价了材料的施工性能、力学性能、抗渗性能等指标。对有效降低高压旋喷止水帷幕工程成本、确保工程质量、实现固废材料的环保再生利用具有显著的社会和经济效益。

2. 试验材料与方案

2.1. 试验材料

试验用土样取自济南机床一厂基坑工程并过 2 mm 方孔筛密封保存备用。其基本物理性质如表 1 所示, 颗粒分析试验结果如图 1 所示。可见, 试验土样中粉粒与黏粒含量占 97%, 其中粉粒占 85.9%, 黏粒占 11.1%, 结合液塑限试验结果判定该土为粉质黏土。天然含水率在 15%~29%, 分布范围较宽, 可能会导致高压旋喷止水帷幕工程中固结体的性能差异。

Table 1. Physical properties of testing soil

表 1. 试验土样物理特性

土粒相对比重	天然含水率(%)	饱和含水率(%)	塑限(%)	液限(%)	塑性指数	渗透系数(cm/s)
2.73	15%~29	39.51	19.98	31.19	11.21	2.47×10^{-5}

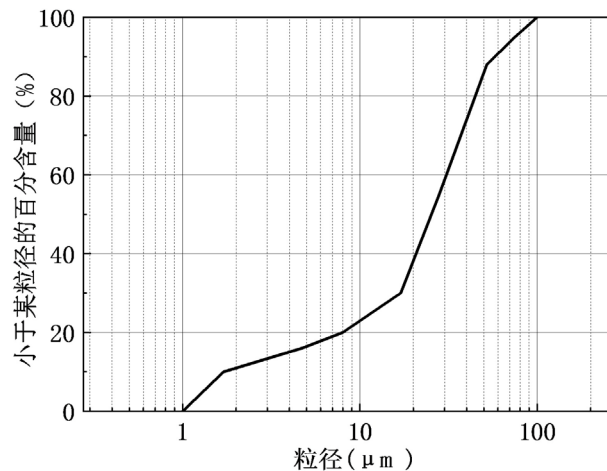


Figure 1. Particle size distribution of silty clay

图 1. 粉质黏土颗粒粒径分布

研发的复合固化剂由水泥、烧结法赤泥、粉煤灰、GM 激发剂组成。其中, 试验用水泥为山东省水泥厂生产的 P.O-42.5 普通硅酸盐水泥。烧结法赤泥取自中国铝业山东分公司, 由于堆存的烧结法赤泥为块状, 在实验室中经破碎过 1 mm 方孔筛后使用。烧结法赤泥主要化学元素组成为 Ca、C、Si、Fe、S、Na 等, 其中含钙量高达 39%, 主要矿物组成为水化硅酸钙、碳酸钙、钙钛矿、铁铝酸钙等。烧结法赤泥干容重较小, 具有较大的比表面积, 吸水性强, 塑限为 53%, 液限可达 70%以上, 且具有强碱性。在复合固化剂中烧结法赤泥颗粒的高吸水性可改善高含水率下的泥浆稳定性。试验中所用粉煤灰取自中国铝

业山东分公司的火力发电厂,其中含有大量球形硅铝玻璃体且具有一定的火山灰活性,但早期活性较低。高细度的粉煤灰可有效填充土体颗粒之间的孔隙,其活性也可被水泥、烧结法赤泥等碱性材料激发,从而提高抗渗性与后期强度。GM 激发剂是由课题组自主研发的水泥激发剂,可显著提高水泥的早期活性,同时其微膨胀作用对提高固化土的抗渗性能具有良好的效果。

2.2. 试验方案

采用复合固化剂与水配制的浆液与水泥浆液的比重不同,且两者与土体形成的混合泥浆的流动度与稳定性也具有较大差异,对高压旋喷止水帷幕的施工性能影响较大,因此需对复合固化剂进行施工性能分析。水灰比是高压旋喷止水帷幕工程中控制浆液配制质量的重要指标,采用浆液比重间接测定。试验中测定了复合固化剂浆液在 0.7、0.9、1.1、1.3 及 1.5 水灰比下的比重,并与水泥浆液进行了对比。固化剂浆液与土体的混合泥浆流动度和稳定性分析时,选取高压旋喷止水帷幕中常用的 15%与 20%固化剂掺量,对 45%、50%、55%、60%、65%与 70%含水率条件下的混合泥浆进行流动度测定。

混合泥浆养护、固化后形成固化土,即复合固化剂固化土和水泥固化土。对两种固化土分别在最优初始含水率(45%)与高初始含水率(55%)条件下 10%、15%、20%及 25%固化剂掺量与 3 d、5 d 及 28 d 养护龄期进行了无侧限抗压强度、抗折强度以及渗透试验,试验中复合固化剂分别采用最优初始含水率与高含水率条件下的最优配合比。

3. 试验结果分析

3.1. 施工性能

3.1.1. 固化剂浆液比重

试验结果如图 2 所示,当水灰比由 0.7 增加至 1.5,该复合固化剂和水泥的浆液比重变化区间分别为 1.29~1.61 和 1.35~1.58。两条曲线在水灰比 0.9~1.1 的区间相交,水灰比在 0.7~0.9 区间内时,复合固化剂的浆液比重高于水泥浆液;当水灰比大于 0.9 时,水泥浆液的比重更大。这是因为烧结法赤泥对固化剂浆液的比重影响较大,水灰比小于 0.9 时,烧结法赤泥因吸水性较强,所以自由水含量减少,浆液比重增大。随着水灰比增加,烧结法赤泥的吸水性达到限值,而粉煤灰与脱硫石膏等材料密度较小,因此复合固化剂浆液比重小于水泥。

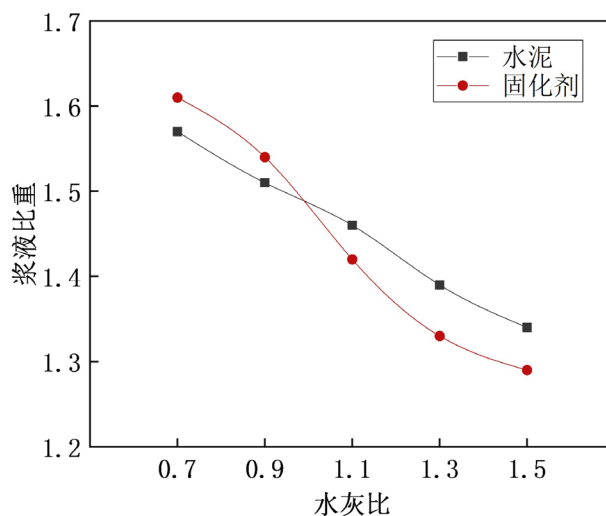


Figure 2. Results of specific gravity of curing agent slurry

图 2. 固化剂浆液比重试验结果

3.1.2. 混合泥浆流动度

流动度反映了高压旋喷止水帷幕施工后固化剂浆液与土体形成的混合泥浆的初始含水率与固化剂掺量情况，试验结果如图 3 所示。混合泥浆的流动度与含水率几乎呈线性正相关关系，相同掺量下复合固化剂的混合泥浆流动度比水泥固化剂低 2~5 cm。两者流动度差异是复合固化剂中掺加的烧结法赤泥导致的。烧结法赤泥颗粒具有发达的微孔体系，对水有很强的吸附能力，从而降低泥浆体系中自由水的含量，导致混合泥浆流动度降低。

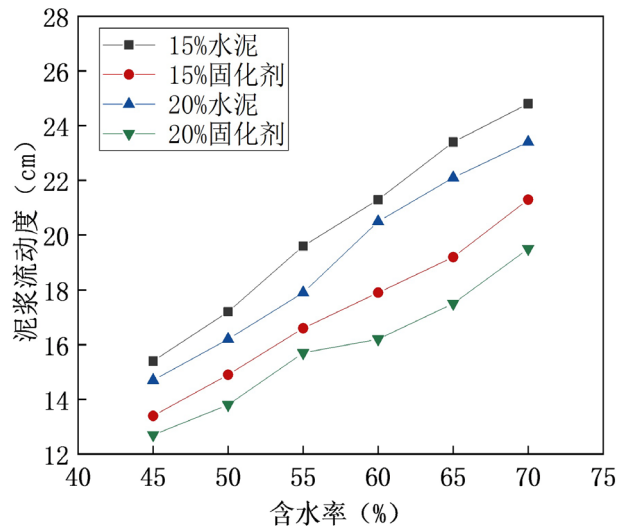


Figure 3. Results of mud fluidity test
图 3. 泥浆流动度试验结果

3.1.3. 混合泥浆稳定性

混合泥浆的稳定性影响高压旋喷止水帷幕的均匀性与成桩质量，相应指标为泥浆析水率。析水率即一定体积的泥浆在 2 h 内的析水量与泥浆体积的比值，析水率越小，泥浆稳定性越好，施工后的固结体均匀性越好。混合泥浆的稳定性试验如图 4 所示。



Figure 4. Stability test of mixed mud
图 4. 混合泥浆稳定性试验

试验结果如图 5 所示，复合固化剂 15%和 20%掺量下，当含水率由 45%增加至 70%，泥浆离析率变化区间分别为 0.48%~14.92%和 1.03%~15.11%，均比相应掺量的水泥泥浆低 2%~5%。即随着含水率的提高，混合泥浆的稳定性逐渐降低。当含水率小于 55%时，混合泥浆离析率随含水率提高增加较为缓慢，

含水率高于 55% 时, 混合泥浆的离析率快速增大。但是无论在何种初始含水率条件下, 复合固化剂的混合泥浆稳定性明显优于水泥。

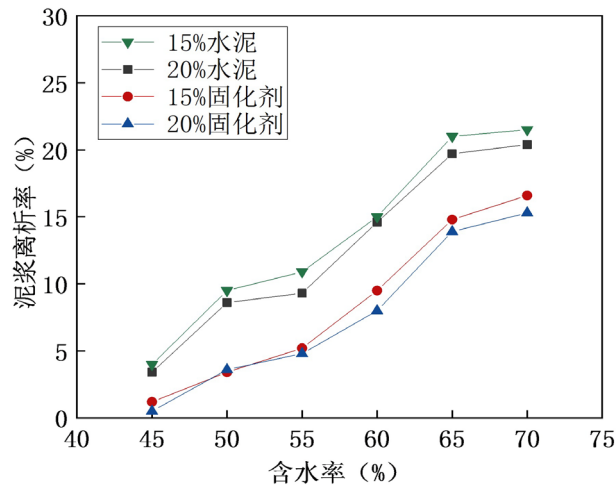


Figure 5. Results of mixed mud stability test
图 5. 混合泥浆稳定性试验结果

3.2. 力学性能

3.2.1. 无侧限抗压强度

复合固化剂与水泥固化土无侧限抗压强度试验结果如图 6 所示, 当初始含水率由 45% 提高至 55% 时, 两种固化土的无侧限抗压强度均大幅降低。45% 初始含水率时, 复合固化剂掺量由 10% 至 25%, 28 d 无侧限抗压强度为 1.49~3.28 MPa, 而水泥固化土已达到 2.04~3.79 MPa。当初始含水率为 55% 时, 15%、20%、25% 掺量的复合固化剂固化土的 28 d 无侧限抗压强度分别比水泥固化土低 0.17 MPa、0.20 MPa 和 0.13 MPa。可见, 复合固化剂固化土的后期强度低于水泥固化土, 但达到 15% 掺量后两者差距很小。比较两者的早期强度, 发现当固化剂掺量为 15%、20% 和 25% 时, 复合固化剂固化土的 3 d 无侧限抗压强度分别比水泥固化土高 0.32 MPa、0.38 MPa、和 0.22 MPa; 7 d 无侧限抗压强度分别高 0.15 MPa、0.45 MPa、和 0.10 MPa。可见该复合固化剂固化土在较高初始含水率时的早期强度明显高于水泥固化土, 即前者表现出明显的早强特性与高初始含水率适用性, 而水泥固化土在大量自由水环境中难以硬化形成早期强度。复合固化剂的早强特性与高初始含水率适用性得益于其中特定的固废掺料, 烧结法赤泥表面粗糙不平的棱柱状晶体交错形成具有发达的微孔结构, 表面能更大, 使复合固化剂吸水性强, 导致泥浆中结合水增加而自由水减少。这一点从烧结法赤泥的高液限特性得以验证。因此, 复合固化剂在较高的含水率时仍能保持较高的水化活性, 相对于水泥土表现出早强特性和高含水率适用性, 该性质与前述混合泥浆稳定性的特征相对应。

3.2.2. 抗折强度

两种固化土抗折强度试验结果如图 7 所示。结果表明, 两者的抗折强度与无侧限抗压强度具有很强的相关性, 固化剂掺量、含水率与养护龄期对固化土抗折强度的影响规律与无侧限抗压强度的规律基本一致。但是, 在抗折强度表现上, 难以比较两者的明显差异。

为进一步分析复合固化剂固化土抗折特性, 计算了两种固化土不同含水率、养护龄期与固化剂掺量的平均拉压强度比, 结果如图 8 所示。复合固化剂固化土的拉压强度比在 15.5%~18.5% 范围内, 水泥土的拉压强度比为 14%~17.5%。随着初始含水率的增加, 固化土的拉压强度比显著降低, 且 45% 至 55% 初始含水率区间内降低幅度较大。随着固化剂掺量的增加, 水泥土的拉压强度比逐渐增大, 复合固化剂仅

在掺量为 25% 时拉压强度比出现了降低现象。

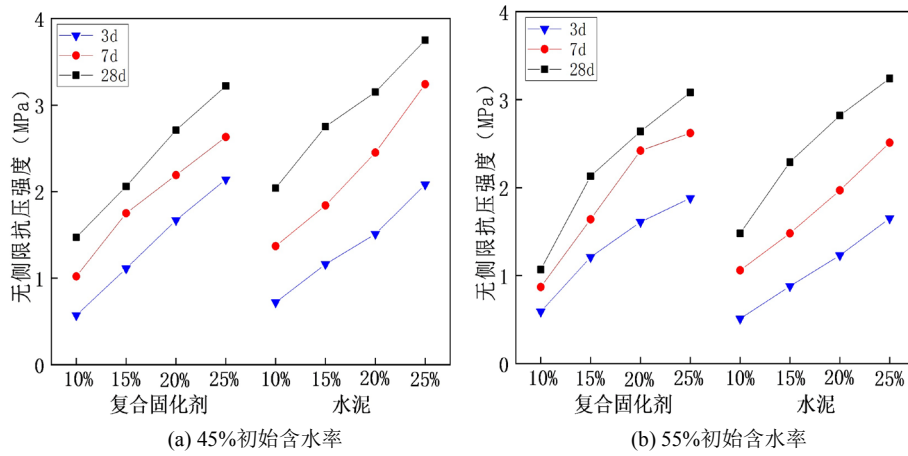


Figure 6. Unconfined compressive strength of composite curing agent and cement cured soil
图 6. 复合固化剂与水泥固化土无侧限抗压强度

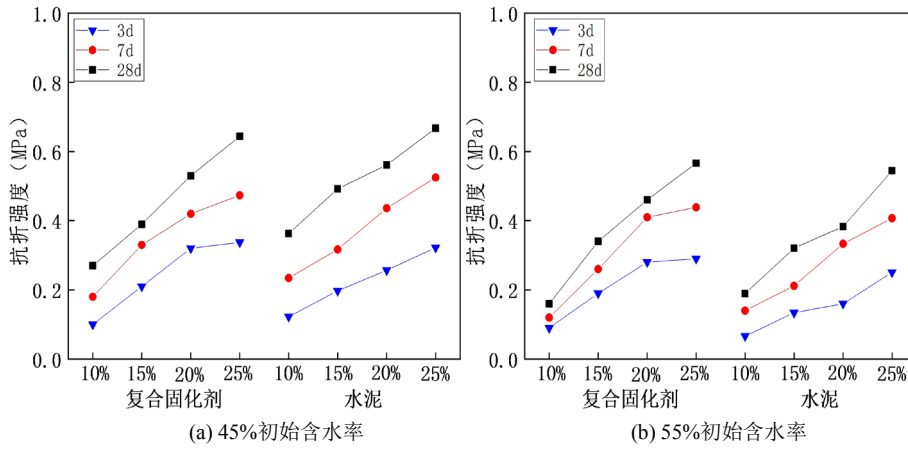


Figure 7. Flexural strength composite curing agent and cement cured soil
图 7. 复合固化剂与水泥固化土抗折强度

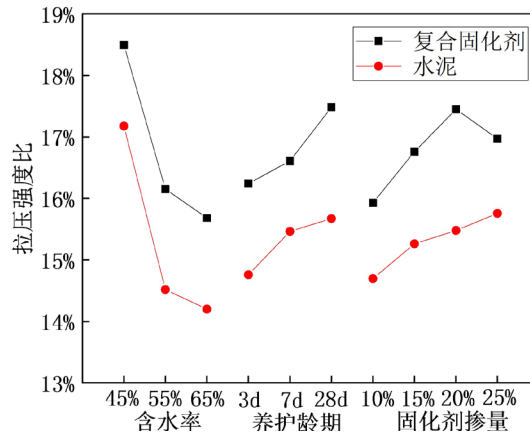


Figure 8. The ratio of tensile strength of composite curing agent and cement cured soil
图 8. 复合固化剂与水泥固化土拉压强度比

3.3. 抗渗性能

在高压旋喷止水帷幕中, 固化土的抗渗性能是保证基坑防水质量与施工安全的重要指标。从图 9 可以看出, 当初始含水率小于等于 55% 时, 复合固化剂固化土的渗透系数总是低于 10^{-5} cm/s 数量级, 而水泥固化土的渗透系数在 55% 初始含水率和 3 d 时达到 10^{-4} cm/s, 说明无论是早期还是后期的抗渗性能, 复合固化剂均明显优于水泥土。随着固化剂掺量的增加, 两种类型的固化土的渗透系数均减少, 45% 初始含水率、25% 掺量时复合固化剂固化土渗透系数可低至 6.61×10^{-8} cm/s。当初始含水率提高时, 两种固化土的抗渗性能出现了不同幅度的衰减, 其中水泥土的渗透系数增长明显, 而复合固化剂固化土的渗透系数变化较小。当复合固化剂掺量提高至 15% 时, 即使 55% 的较高初始含水率, 复合固化剂固化土渗透系数仍保持在 10^{-5} cm/s 以下, 满足防渗要求。说明该复合固化剂具有较好的抗渗性能及高含水率适应性, 满足工程防渗要求。

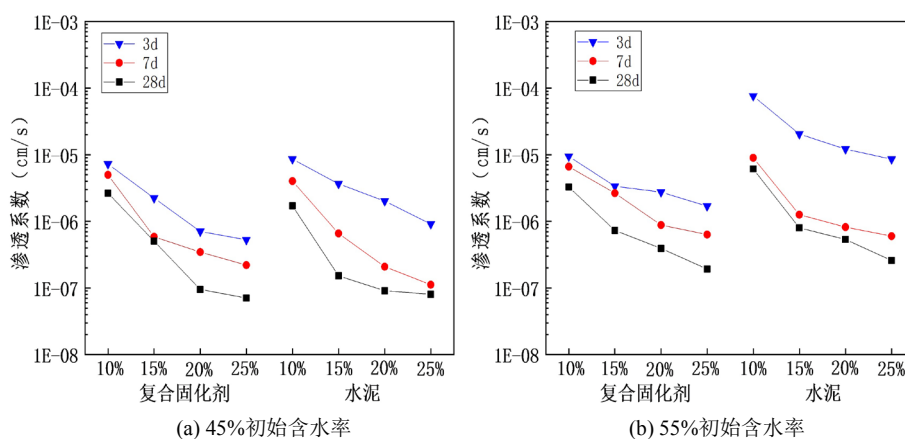


Figure 9. Permeability coefficient of composite curing agent and cement cured soil
图 9. 复合固化剂与水泥固化土渗透系数

4. 结论

本文对复合固化剂的施工性能、力学性能、抗渗性能进行了研究, 并与水泥进行了对比分析。主要结论如下:

1) 固化剂的浆液比重、混合泥浆流动度均与含水率具有明显的线性关系。水灰比小于 0.9 时, 复合固化剂的浆液比重大于水泥, 当水灰比高于 0.9 时, 水泥浆液比重更大。相同掺量下复合固化剂的混合泥浆流动度比水泥固化剂低 2~5 cm。

2) 复合固化剂的混合泥浆稳定性明显优于水泥, 离析率比水泥混合泥浆低 2%~5%。随着含水率的提高, 混合泥浆的稳定性逐渐降低, 当含水率小于 55% 时, 混合泥浆离析率随含水率提高增加较为缓慢。

3) 复合固化剂具有明显的早强特性与高初始含水率适用性。高初始含水率条件下, 复合固化剂固化土的早期强度高于同掺量水泥土, 但其长期强度增长幅度低于水泥土。初始含水率提高时, 复合固化剂固化土的强度降低略低于水泥土。复合固化剂固化土的拉压强度比在 15.5%~18.5% 范围内, 水泥土的拉压强度比为 14%~17.5%, 复合固化剂固化土比水泥土具有更好的抗折特性。

4) 复合固化剂固化土的抗渗性能在 45% 初始含水率条件下与水泥土接近, 在高含水率条件下优于水泥土。当复合固化剂掺量提高至 15% 时, 试件的渗透系数控制在 10^{-5} cm/s 以下, 满足防渗要求。该复合固化剂的固化土具有较好的抗渗性能及显著的高含水率适应性, 满足工程防渗要求。

基金项目

山东省交通厅科技发展计划(2016B20, 2019B47_2), 山东大学青年学者未来计划资助。

参考文献

- [1] 蒙强, 邵俐, 施倩芸. 粉煤灰水泥土力学特性试验研究[J]. 上海理工大学学报, 2017, 39(5): 490-496.
- [2] 董玉萍, 张玉佩. 高钙粉煤灰水泥土早期强度试验[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(10): 3248-3252.
- [3] 崔靖俞, 解邦龙, 季港澳, 等. 粉煤灰水泥土渗透性能的试验研究[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(34): 323-329.
- [4] 梁仕华, 曾伟华. 干湿循环条件下水泥粉煤灰固化南沙淤泥土试验研究[J]. 工业建筑, 2018, 48(7): 83-86, 43.
- [5] 黄新, 胡同安. 工业废石膏与水泥配合加固软土地基[J]. 建筑技术, 2001, 32(3): 161-163.
- [6] 黄新, 宁建国, 郭晔, 等. 水泥含量对固化土结构形成的影响研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(4): 436-441.
- [7] 霍曼琳, 陈鹏柱, 潘艳华. 深层淤泥土中高压旋喷桩浆液材料与施工工艺研究[J]. 施工技术, 2011, 40(7): 47-49, 53.
- [8] Papageorgiou, A., Tzouvalas, G. and Tsimas, S. (2005) Use of Inorganic Setting Retarders in Cement Industry. *Cement and Concrete Composites*, **27**, 183-185. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.02.005>
- [9] Tzouvalas, G., Rantis, G. and Tsimas, S. (2004) Alternative Calcium-Sulfate-Bearing Materials as Cement Retarders: Part II. FGD Gypsum. *Cement and Concrete Research*, **34**, 2119-2124. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.03.021>
- [10] 米栋云. 赤泥的掺入对水泥土特性的影响[D]: [硕士学位论文]. 太原: 太原理工大学, 2017.
- [11] 陈金辉. 镍铁渣粉水泥土的固化机理试验研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2020, 18(1): 122-127.
- [12] 柯开展. 早龄期镍铁渣粉水泥土强度试验研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2018, 16(4): 192-195.
- [13] 庞文台, 申向东. 复合水泥土抗渗性能的实验研究[J]. 硅酸盐通报, 2012, 31(6): 1617-1620, 1625.
- [14] 王贤昆, 庞建勇, 王强. 复合水泥土无侧限抗压强度正交试验研究[J]. 长江科学院院报, 2015(12): 72-75.
- [15] Telesca, A., Marroccoli, M., Calabrese, D., et al. (2013) Flue Gas Desulfurization Gypsum and Coal Fly Ash as Basic Components of Prefabricated Building Materials. *Waste Management*, **33**, 628-633. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.10.022>
- [16] Poon, C.S., Qiao, X.C. and Lin, Z.S. (2004) Effects of Flue Gas Desulfurization Sludge on the Pozzolanic Reaction of Rejected-Fly-Ash Blended Cement Pastes. *Cement and Concrete Research*, **34**, 1907-1918. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.02.027>