

水泥基固化剂对余泥的固化效果研究

孙佳诚¹, 朱亚光^{1,*}, 徐培蓁¹, 乔旭², 陈发滨²

(1. 青岛理工大学 土木工程学院, 青岛 266525; 2. 中建八局第二建设有限公司, 济南 250014)

摘要: 地铁施工过程中产生的地铁弃渣、盾构泥浆经泥砂分离、压滤形成的余泥, 是工业一大固体废弃物。为实现余泥的资源化利用, 研究了 2 种水泥基固化剂对不同含水率余泥的固化效果, 分析了固化剂的固化机理。结果表明: I 类固化剂主要通过 C-S-H 凝胶与钙矾石晶体对土颗粒的胶结黏聚作用进行固化, 固化余泥无侧限抗压强度较高, 最高可达 15.01 MPa; II 类固化剂主要通过 C-S-H 凝胶以及 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、 CaCO_3 对土体结构的填充作用进行固化, 固化后余泥耐水性较好。余泥固化强度随水泥含量的增大而增大; 固化剂在不同含水率下存在最佳配比, 在含水率为 20% 时, 用 10% 水泥掺量的 I 类固化剂经济有效; 含水率为 25%~35% 时, 用 12% 水泥掺量的 I 类固化剂固化效果最好。

关键词: 余泥; 固化剂; 最佳配比; 固化机理; 无侧限抗压强度

中图分类号: TU411.6

文献标志码: A

文章编号: 1673-4602(2024)03-0027-08

Study on the curing effect of cement-based curing agent on residual mud

SUN Jiacheng¹, ZHU Yaguang^{1,*}, XU Peizhen¹, QIAO Xu², CHENG Fabin²

(1. School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, China;

2. China Construction Eighth Bureau Second Construction Co. Ltd., Jinan 250014, China)

Abstract: The waste slag produced during the construction of subway and the residual mud formed by the separation and pressure filtration of shield mud are major industrial solid waste. In order to realize the resource utilization of residual mud, the curing effect of two cement-based curing agents on residual soil with different moisture contents was studied and the curing mechanism of the curing agents was analyzed. The results showed that class I curing agents cured mainly through the cementation and agglomeration of soil particles by C-S-H gel and calcium alumina crystals. The unconfined compressive strength of the cured residual mud was high, up to 15.01 MPa. Class II curing agents cured mainly through the filling effect of C-S-H gel, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ and CaCO_3 on the soil structure, and the water resistance of the cured residual mud was good. The cured strength of residual mud increases with the increase of cement content; the optimal ratio of curing agents exists under different water contents; when the water content is 20%, the class I curing agent with 10% cement dose is economical and effective; when the water content is 25%—35%, the class I curing agent with 12% cement dose has the best effect.

收稿日期: 2023-03-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51878365)

作者简介: 孙佳诚(1997—), 男, 浙江湖州人。硕士, 研究方向为建筑废弃物资源化利用。E-mail: 1607400338@qq.com。

* 通信作者: 朱亚光(1974—), 男, 吉林洮安人。博士, 副教授, 主要从事建筑废弃物资源化利用方面的研究。E-mail: zygd@sina.com。

Key words: residual mud; curing agent; optimal ratio; curing mechanism; unconfined compressive strength

随着城市化进程的不断加快,越来越多的工程弃土被堆填弃置,不仅占用土地资源,造成环境污染,甚至会产生安全隐患^[1]。深圳 2017—2020 年工程弃土年产生量约为 9150 万 m³,占建筑垃圾年产生量的 92%,并且深圳还因弃土堆积失稳导致工程事故的发生(2015 年光明新区山体滑坡事故),以深圳为代表的许多城市面临着弃土围城的危机^[2],工程弃土的处理问题迫在眉睫。

工程弃土经泥沙分离工艺后可分为砂石骨料与余泥。目前分离出的砂石骨料已广泛应用于实际工程,而余泥由于含水率高、颗粒间的摩擦力小、强度低和稳定性差的特点,难以直接作为材料使用,多被填埋或堆弃^[3],因此如何对余泥进行高效合理地资源化处理对城市的可持续发展十分重要。余泥的主要成分是黏土,经固化剂固化后的余泥可用于路基填实、种植土、制作非烧结砌块等,提高了余泥的资源化利用率^[4]。目前国内外学者针对普通黏土^[5]、淤泥^[6]、污泥^[7-8]、砂土^[9-10]等都配制出了相应的固化剂,但是固化强度普遍较低,并且针对余泥固化剂的研究少有提及。因此针对不同含水率配制出高效经济的余泥固化剂具有实际意义。

配制了 2 种水泥基固化剂分别对余泥进行固化,比较不同配比下的固化强度,分析固化剂的固化机理,为余泥的资源化利用提供思路与方向。

1 试验

1.1 原材料及基本性质

- 1) 余泥:由深圳市某企业设备压滤脱水后的余泥,化学组成如表 1 所示,物理性能如表 2 所示。
- 2) 水泥:由深圳市某公司提供的凯城牌 P·O 42.5 水泥,化学成分如表 1 所示,物理性能如表 3 所示。
- 3) 石膏:由深圳市某公司提供的熟石膏,化学组成如表 1 所示。
- 4) 粉煤灰:由深圳市某公司提供,化学组成如表 1 所示,物理性能如表 4 所示。
- 5) 凝固剂:由青岛市某化工企业提供。
- 6) 拌和水:实验室自来水。

表 1 原材料化学成分

原材料	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O
余泥	63.92	24.27	0.64	0.26	1.78	—	2.29	4.12
水泥	23.01	5.63	61.38	1.77	3.89	2.62	—	—
石膏	2.75	0.78	37.41	0.95	0.49	43.11	—	—
粉煤灰	58.00	30.00	1.50	0.24	4.36	2.17	1.71	—

表 2 余泥物理性能

最大干密度/(g·cm ⁻³)	液限/%	塑限/%	液性指数	塑性指数	烧失量/%
1.69	34.80	19.10	0.59	15.70	8.01

表 3 水泥物理性能

比表面积/ (m ² ·kg ⁻¹)	Cl ⁻ 含量/%	标准稠度/%	烧失量/%	凝结时间/min		抗折强度/MPa		抗压强度/MPa	
				初凝	终凝	3 d	28 d	3 d	28 d
365	0.06	26.8	1.77	175	235	4.9	8.1	26.9	48.6

表4 粉煤灰物理性能

粉煤灰种类	细度(45 μm方孔筛)/%	密度/(g·cm ⁻³)	烧失量/%	需水量/%	28 d 活性指标/%	比表面积/(m ² ·kg ⁻¹)
Ⅱ级	21.5	2.4	1.13	92.5	89	410

1.2 试验组含水率范围的确定

含水率是影响固化效果的关键因素,首先通过预试验确定出试验组余泥合理的含水率范围。印长俊等^[11]、郭培玺等^[12]发现较为经济合理的水泥掺量在10%~20%。为尽量减少水泥用量,用10%的水泥对含水率为10%~40%的余泥进行固化,依据固化后7 d强度确定试验组余泥的最终含水率。用压力机将固化余泥压入直径和高均为50 mm圆柱体模具。拆模后置于养护箱中(湿度大于95%,温度(20±2)℃)养护,试件达到指定龄期后,取两侧平整光滑的试件置于夹具中,用DY-208压力试验机匀速加载,测试其无侧限抗压强度。7 d抗压强度如表5所示。

由表5可以看出,当含水率在15%~35%时,余泥固化强度较高,小于15%或大于35%时,余泥固化强度较低。为得到较高强度,另因压滤设备很难将含水率控制在20%以下,最终确定20%、25%、30%、35%含水率为试验组参数变量。

1.3 固化剂试验参数的确定

通过“掺入比”(固化材料质量占余泥质量之比)表示固化材料的掺量。Ⅰ类固化剂由水泥、粉煤灰、石膏组成,粉煤灰与石膏固定掺量分别为4%、2%。Ⅱ类固化剂由水泥和商品凝固剂组成,商品凝固剂主要成分为柠檬酸和氯化钠,取固定值2%。

以水泥含量与含水率为变量设置试验组,含水率取20%、25%、30%、35%。Ⅰ类固化剂中,水泥取8%、10%、12%的掺量分组;Ⅱ类固化剂中,因凝固剂对余泥可起到一定的激发催化作用,故水泥可适当降低用量,分别取6%、8%分组。试验共20组试件,对其进行编号。例:Ⅰ8-30表示由8%水泥掺量、30%含水率的Ⅰ类固化剂固化后的试件。

1.4 性能测试与表征

测试试件不同龄期(3、7、14、28 d)的抗压强度,试验方法参照预试验。试验以软化系数表征试件的耐水性,软化系数为试件饱和状态抗压强度与干燥状态抗压强度之比。

压汞试验:取28 d代表性试件作为试验组,将试件切成5 mm×5 mm×10 mm的小长方体,干燥后用Autopore IV 9500高压压汞仪进行压汞试验,测量最小孔径为3~5.5 nm,最大汞压为275~415 MPa。

X射线衍射试验(以下简称XRD试验):将28 d代表性试件采用压片法制备样品,用布鲁克D8 Advanced X射线衍射仪对样品进行XRD试验,扫描范围为5~80°,扫描步长为0.02°。

扫描电子显微镜试验(以下简称SEM试验):取28 d代表性试件平整光滑的面为观察面,其他面用砂纸打磨至厚度为2 mm的试块,再将镀金处理后的试件置于GeminiSEM 300场发射扫描电镜下进行5000倍放大倍数的SEM试验。

2 试验结果与分析

2.1 固化后余泥的强度与耐水性

图1为Ⅰ类固化剂固化余泥强度对比。图2为Ⅱ类固化剂固化余泥强度对比。由图1、图2可知:在含水率和龄期一定时,固化剂中水泥的掺量极大地影响了固化余泥的强度,水泥掺量越高,固化余泥强度越大;经两类固化剂固化后的余泥强度随着龄期延长而增长,固化强度增长速率都随着龄期延长逐渐变缓,28 d趋于稳定,整体强度达到稳定时间较短。不同的是,Ⅰ类固化剂在3~7 d的固化强度增长速率明

表5 不同含水率下固化余泥7 d抗压强度

含水率/%	抗压强度/MPa
10	1.98
15	3.05
20	8.11
25	5.99
30	3.03
35	2.00
40	1.45

显要大于Ⅱ类固化剂,说明Ⅰ类固化剂对于余泥早期强度的提升效果比Ⅱ类固化剂更好。

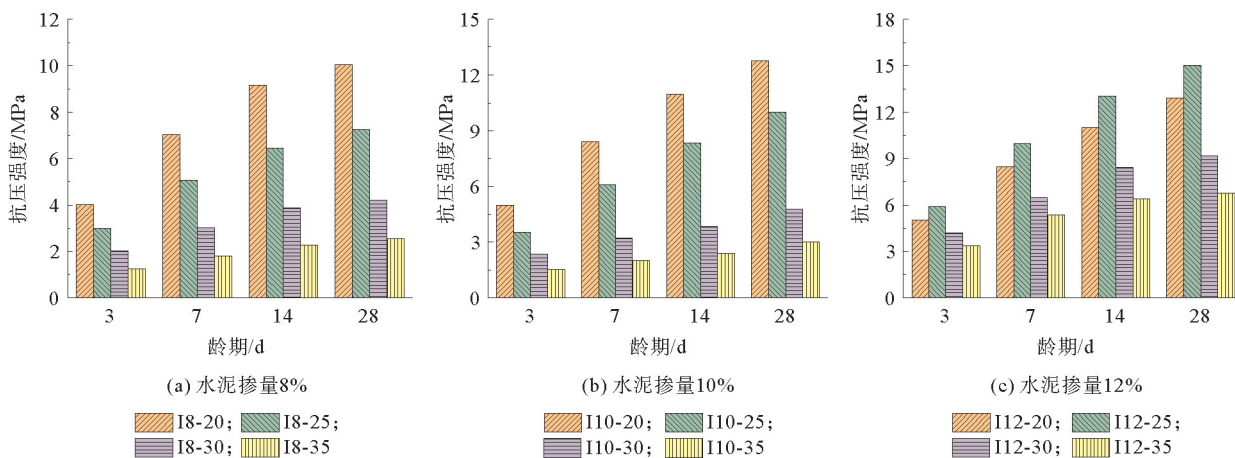


图1 不同水泥掺量下Ⅰ类固化剂对固化余泥强度的影响

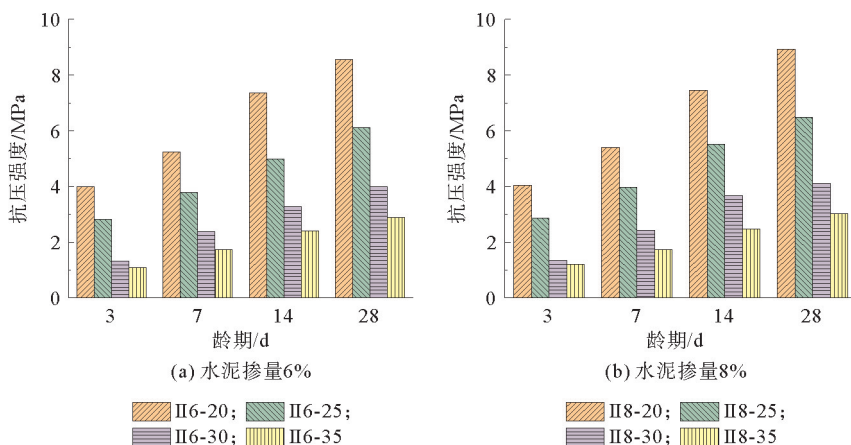


图2 不同水泥掺量下Ⅱ类固化剂对固化余泥强度的影响

不同含水率对固化后余泥强度及软化系数的影响规律如图3和图4所示。从图3、图4中可知:余泥固化强度及耐水性整体上随着含水率的增大而减小。但Ⅰ12组试件强度与软化系数在含水率25%时存在明显拐点,这是因为水泥含量为12%时,20%含水率下的水分不足以使固化剂中水泥完全水化,无法产生大量提供强度及耐水性的水化产物,故随着含水率的增加,剩余固化剂会继续反应提高试件强度。而在含水率过高的条件下,不参与固化反应的自由水分子会对土壤内部结构产生“润滑”作用,破坏水化产物与土壤之间的胶结,降低基体的整体性,从而降低强度。因此固化剂中水泥的水化产物在余泥中的相对含量是决定固化效果的主要因素,水泥掺量与含水率之间存在最优配比。

从图3中可以看出,两类固化剂都提高了固化余泥的强度。试件28d抗压强度最高能达到15.01 MPa,最低也在2.5 MPa以上。并且Ⅰ8-20、Ⅰ10-20、Ⅰ12-20与Ⅰ10-25、Ⅰ12-25强度都在10 MPa以上,满足作建筑材料的强度要求。当余泥含水率为20%时,10%与12%水泥掺量的Ⅰ类固化剂固化余泥28d抗压强度相对较高,分别为12.76和12.91 MPa,二者强度相差不大,出于经济性考虑选择掺量10%为水泥最优掺量。余泥含水率为25%~35%时,12%水泥掺量为Ⅰ类固化剂中水泥最优掺量。

从图4中可以看出:固化后试件具有良好的耐水性。除Ⅰ8-35与Ⅱ6-35,其余含水率35%的试件软化系数都大于0.85,能够满足长期用于潮湿环境的要求。其次,同一含水率下,Ⅱ8的软化系数都高于Ⅰ8,并且在30%、35%含水率下,Ⅱ8的软化系数折线图与Ⅰ10重合,Ⅱ6与Ⅰ8软化系数数值相近,可以看

出同水泥掺量下 II 类固化剂固化余泥的耐水性更好。

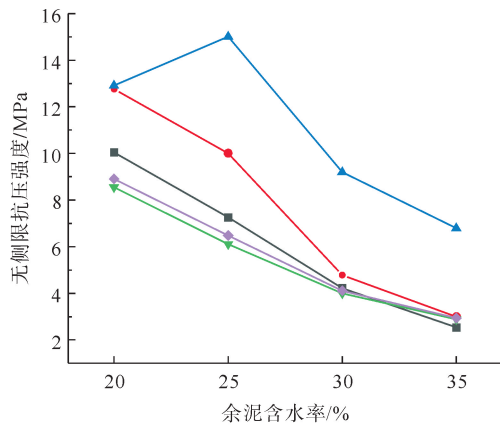


图 3 28 d 抗压强度对比

—■— I8; —●— I10; —▲— I12; —▼— II6; —◆— II8

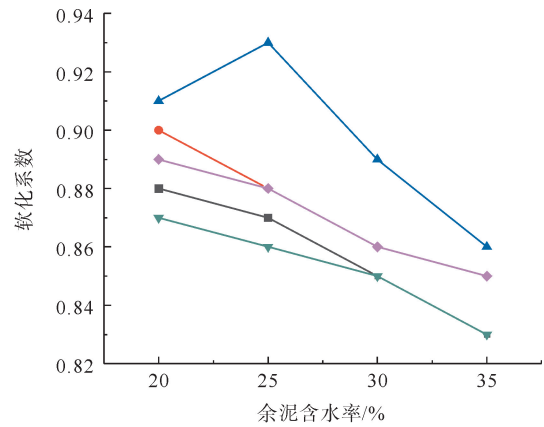


图 4 28 d 软化系数对比

—■— I8; —●— I10; —▲— I12; —▼— II6; —◆— II8

2.2 固化对余泥孔结构的影响

图 5 为两类固化剂固化后余泥内部的孔径分布,由图 5 可以看出两类固化剂固化后试件内部的孔径大小分布受水泥掺量与含水率的影响。随着水泥含量的增加与含水率的减小,余泥内部大孔径(>50 nm)比例减小,微孔(<50 nm)比例提高,该现象主要是由于随着水泥含量增加,水化产物相应增加,内部大孔径被填充分割为多个互不连通的小孔,孔隙率降低,整体更加密实;水分在余泥内部干燥后会形成孔隙,随含水率的增加,内部孔隙率相应增加。随含水率的降低,孔隙率下降,密实度提升,对应宏观结果为力学性能和耐水性提升。

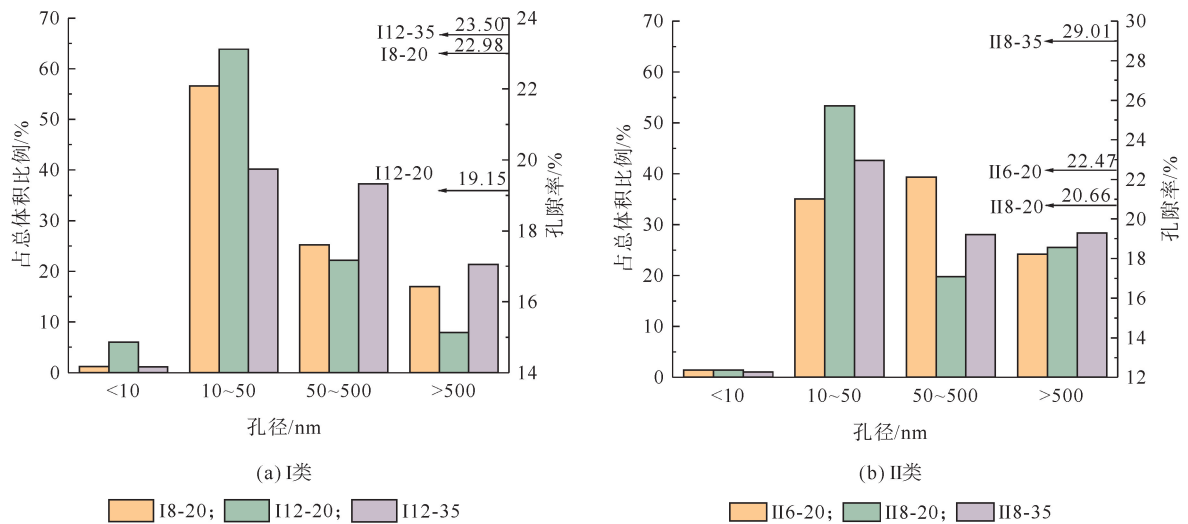


图 5 试件孔径分布

2.3 XRD 试验结果分析

取未固化余泥、I 12-25、II 8-20 3 组试件进行 XRD 试验。与图 6(a)相比,图 6(b)(c)中出现明显的钙矾石(Aft)、单硫型水化硫铝酸盐(AFm)、Ca(OH)₂ 与 CaCO₃ 的峰。由于余泥固化过程生成的凝胶体大多为无定形结构,C-S-H 类凝胶物质是在硅钙复合体系反应过程中生成的结晶度较低的晶态聚合物,在 XRD 图谱出现的衍射峰峰强较低,在 20~40°之间出现较为宽泛弥散峰形。水泥基类固化剂固化土的化学反应由自身组分的化学反应及固化剂与土体间的活性组分反应组成^[13-14]。两类固化剂都在水泥的水化

作用下生成了 C-S-H 凝胶与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的碳酸化作用生成了 CaCO_3 。不同的是, I 类固化剂中的部分 C-S-H 凝胶是由粉煤灰的火山灰效应产生,石膏与水泥中含铝相水化物反应生成钙矾石。II 类固化剂中的钙矾石则是由凝固剂中的硫酸根离子与水化产物反应生成,且伴随水化反应生成 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 。

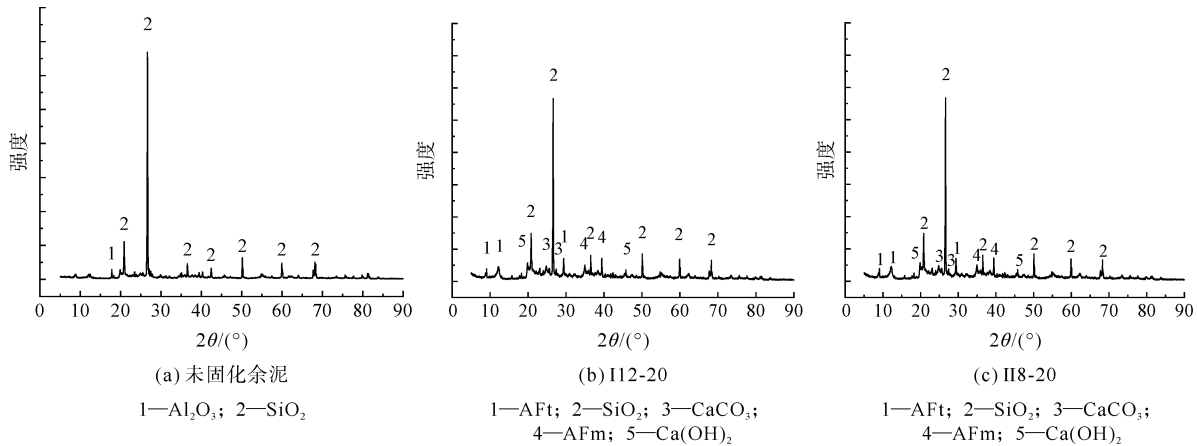


图6 余泥固化前后 X 射线衍射图

2.4 SEM 试验结果分析

图7为未固化余泥 SEM 图像,从图中可以看出:未固化余泥土体单元体大小不均,土颗粒表面较光滑且分布散乱,整体存在较多孔隙,未发现胶凝物质及晶体颗粒,可反映出土颗粒之间黏聚力较低,内部结构不稳定。

图8为 I 类固化剂固化余泥 SEM 图像。从图中可以看出:余泥内部产生了明显的纤维状 C-S-H 凝胶、针棒状的钙矾石以及块状 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 与 CaCO_3 ,土体颗粒间孔隙较未固化余泥明显减少,内部结构相对密实。比较图8(a)(b)可以看出水泥含量较高的(b)图中含有更多 C-S-H 凝胶以及钙矾石,并且相互之间搭接形成了网状结构,土体结构较(a)图更加紧实致密,这能说明在含水率一定时,水泥掺量增加促进了更多水化物的生成。比较图8(b)(c)(d)发现同一水泥含量下,25%含水率的(c)图中固化后的余泥内部被填充了大量的针棒状钙矾石,相对而言,20%与35%含水率的余泥内部空间密度较小,与前述力学性能对应,从微观角度证明含水率存在最优配比,偏大或偏小都会影响水化产物在余泥内部的相对含量。

图9为 II 类固化剂固化余泥 SEM 图像,从图中可以看出:在 II 类固化剂的作用下,余泥内部同样产生了 C-S-H 凝胶、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 与 CaCO_3 ,但 C-S-H 凝胶与针棒状钙矾石相对 I 类较少, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 与 CaCO_3 含量相对更为明显。这是因为固化剂中凝固剂的含量较少,柠檬酸中只有极少量的 SO_4^{2-} 参与生成钙矾石。C-S-H 凝胶对土颗粒的包裹黏聚作用是水泥基类固化剂固化土体最主要的因素,而且钙矾石对强度发展,特别是早期强度发展影响很大^[15-16],因此同水泥掺量下 II 类固化剂固化余泥强度及早期强度提升速率都要低于 I 类。另外,由于凝固剂中含有的柠檬酸与氯化钠组分能够平衡减弱余泥表面双电子层的厚度,改善水泥浆的流动性^[17-18],从而加快固化剂本身以及固化剂和余泥之间的水化反应,因此能产生更多 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 与 CaCO_3 晶体,较多的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 又提高了余泥内部的 PH 值与 Ca^{2+} 含量,使得余泥土颗粒表面的 Si 和 Al 被激发,与游离的 Ca^{2+} 继续反应生成 C-S-H 凝胶,此类与土颗粒反应生成的凝胶更加稳定,在固化中后期逐步析出为微晶凝胶,极大提高结构致密性,因此其耐水性相对 I 类更好。

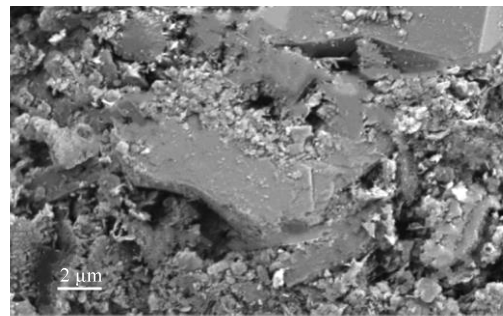


图7 未固化余泥 SEM 图像

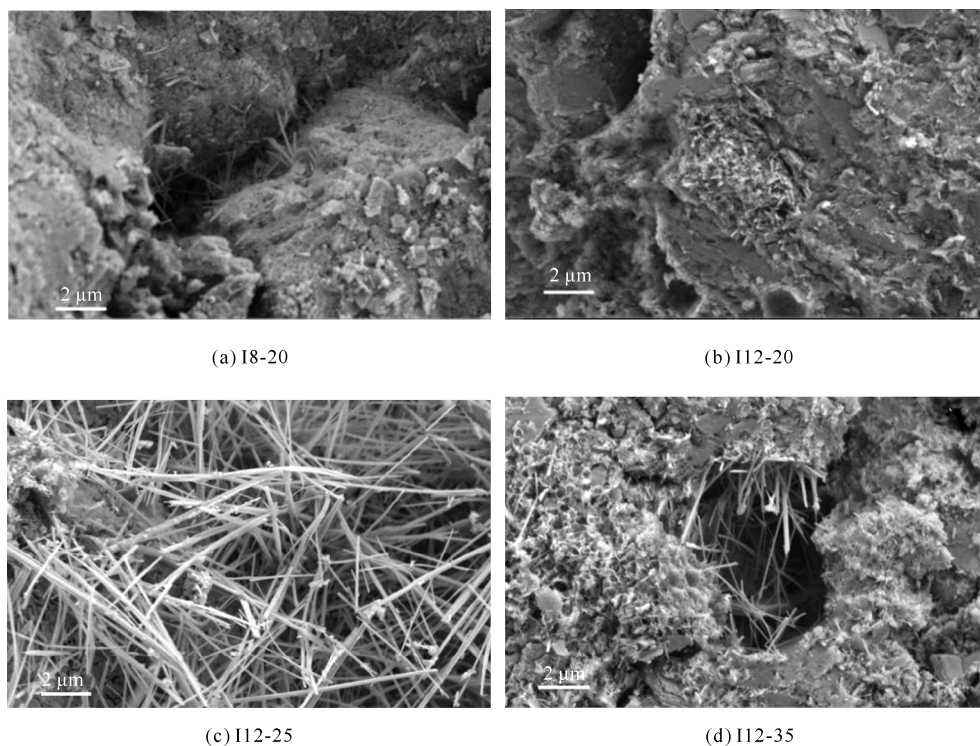


图 8 I 类固化剂固化余泥 SEM 图像

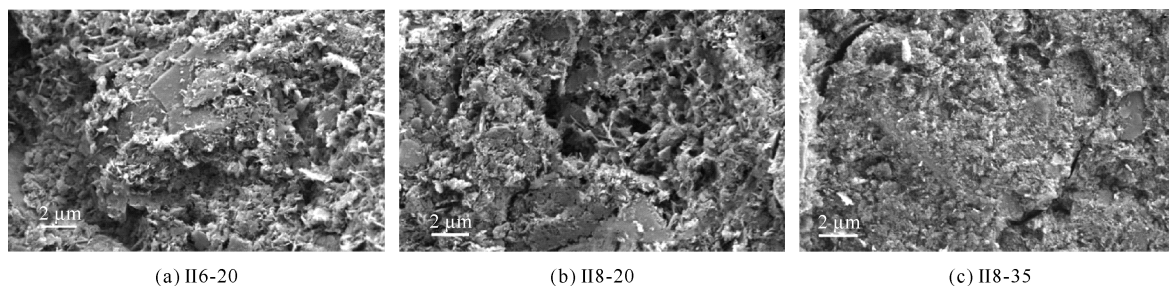


图 9 II 类固化剂固化余泥 SEM 图像

3 结论

1) 固化剂中水泥含量与含水率会影响固化后余泥内部孔径大小分布和整体孔隙率。水泥含量越高,含水率越低,大孔隙比例越小,整体孔隙率越低,密实度越高。

2) 两类水泥基固化剂通过水化生成的 C-S-H 凝胶、钙矾石晶体、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 与 CaCO_3 对余泥土体的胶结填充作用进行固化。I 类固化剂的固化作用主要源于 C-S-H 凝胶与钙矾石晶体对土颗粒的胶结吸附作用,固化余泥强度相对较高。II 类固化剂对余泥的固化作用主要源于 C-S-H 凝胶、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 与 CaCO_3 对孔隙的填充作用,固化后余泥耐水性能相对较好。

3) 余泥固化后抗压强度与耐水性随固化剂中水泥含量的增多而提高,固化剂在不同含水率存在最优配合比。余泥含水率为 20% 时,用水泥含量为 10% 的 I 类固化剂更加经济有效,28 d 抗压强度可达 12.76 MPa;余泥含水率为 25%~35% 时,用 12% 水泥含量的 I 类固化剂效果最好,28 d 抗压强度最高可达 15.01 MPa。

参考文献(References):

- [1] 肖建庄,沈剑羽,高琦,等. 工程弃土现状与资源化创新技术[J]. 建筑科学与工程学报,2020,37(4):1-13.
XIAO Jianzhuang, SHEN Jianyu, GAO Qi, et al. Current situation and innovative technology for recycling of engineering waste soil[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2020, 37(4): 1-13.
- [2] 李思文,王毅,李师. 国外余泥渣土的处置方法及其借鉴作用[J]. 中国土地,2020(12):44-46.
LI Siwen, WANG Yi, LI Shi. The disposal method of foreign residual soil and its role of reference[J]. China Land, 2020(12): 44-46.
- [3] 黄桐,寇世聪,赵玉龙,等. 日本余泥渣土管理经验与启示[J]. 环境卫生工程,2020,28(5):61-67.
HUANG Tong, KOU Shicong, ZHAO Yulong, et al. Management experience and enlightenment of Japan's residual mud and soil[J]. Environmental Sanitation Engineering, 2020, 28(5): 61-67.
- [4] 周海龙,申向东. 土壤固化剂的应用研究现状与展望[J]. 材料导报,2014,28(9):134-138.
ZHOU Hailong, SHEN Xiangdong. Application research situation and prospect of soil stabilizer[J]. Materials Review, 2014, 28(9): 134-138.
- [5] ZHANG Y P, WANG Z L, ZHENG Y F. Research and application of soil solidifying agent[J]. E3S Web of Conferences, 2020, 165: 03026.
- [6] 陈萌,杨国录,徐峰,等. 淤泥固化处理研究进展[J]. 南水北调与水利科技,2018,16(5):128-138.
CHEN Meng, YANG Guolu, XU Feng, et al. Research progress on solidification treatment of dredged silt[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(5): 128-138.
- [7] 钱觉时,谢从波,谢小莉,等. 城市生活污水污泥建材利用现状与研究进展[J]. 建筑材料学报,2014,17(5):829-836.
QIAN Jueshi, XIE Congbo, XIE Xiaoli, et al. Utilization of municipal sewage sludge as building materials: A state-of-the-art review[J]. Journal of Building Materials, 2014, 17(5): 829-836.
- [8] KATSIOTI M, KATSIOTIS N, ROUNI G, et al. The effect of bentonite/cement mortar for the stabilization/solidification of sewage sludge containing heavy metals[J]. Cement & Concrete Composites, 2008, 30(10): 1013-1019.
- [9] CONAOLINC, ROSADA, CRUZRC, et al. Water content, porosity and cement content as parameters controlling strength of artificially cemented silty soil[J]. Engineering Geology, 2011, 122(3/4): 328-333.
- [10] 屠晨阳. 水泥固化砂质粉土的强度试验及其机理研究[D]. 杭州:浙江理工大学,2018.
TU Chenyang. Research on the strength experiment and solidification mechanism of cement solidified sandy silt[D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2018.
- [11] 印长俊,马石城. 水泥红土的力学性能试验研究[J]. 湘潭大学自然科学学报,2004(2):99-101.
YIN Changjun, MA Shicheng. Experimental study on the mechanical properties of cement red mud[J]. Natural Science Journal of Xiangtan University, 2004(2): 99-101.
- [12] 郭培玺,阮怀宁. 红粘土地区水泥土强度的试验研究[J]. 岩土工程技术,2006(3):132-135.
GUO Peixi, RUAN Huaining. Experimental research on strength of cemented red clay[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2006(3): 132-135.
- [13] 樊恒辉,吴普特,高建恩,等. 水泥基土壤固化剂固化土的微观结构特征[J]. 建筑材料学报,2010,13(5):669-674.
FAN Henghui, WU Pute, GAO Jian'en, et al. Microstructure characteristics of soil stabilized with cement-based soil stabilizer[J]. Journal of Building Materials, 2010, 13(5): 669-674.
- [14] 张国防,王博,张海旭,等. OPC-GBFS-NS体系土体硬化剂固化土壤的作用效果研究[J]. 建筑材料学报,2022,25(1):61-67.
ZHANG Guofang, WANG bo, ZHANG Haixu, et al. Effects of OPC-GBFS-NS system based soil stabilizer on soil stabilization[J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(1): 61-67.
- [15] 钱觉时,余金城,孙化强,等. 钙矾石的形成与作用[J]. 硅酸盐学报,2017,45(11):1569-1581.
QIAN Jueshi, YU Jincheng, SUN Huaqiang, et al. Formation and function of ettringite in cement hydrates[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2017, 45(11): 1569-1581.
- [16] 王志良,王竞宇,申林方,等. 红黏土置换作用对水泥固化泥炭土强度的影响[J]. 建筑材料学报,2019,22(1):87-93.
WANG Zhiliang, WANG Jingyu, SHEN Linfang, et al. Effect of red clay replacement on strength of cement stabilized peaty soil[J]. Journal of Building Materials, 2019, 22(1): 87-93.
- [17] 姚晓,段伶俐. 柠檬酸在油井水泥中的作用机理[J]. 钻井液与完井液,1992,9(2):39-42.
YAO Xiao, DUAN Lingli. The action mechanism of citric acid in oil well cement[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 1992, 9(2): 39-42.
- [18] 张少龙,高建恩,李兴华,等. 含盐量对MBER土壤固化剂加固土性能的影响试验[J]. 水电能源科学,2015,33(11):133-135.
ZHANG Shaolong, GAO Jian'en, LI Xinghua, et al. Impact experiment of salinity on the stabilized soil properties with MBER soil stabilizer[J]. Water Resources and Power, 2015, 33(11): 133-135.

(责任编辑 张晓靖;英文校审 程文华)