

改性地聚物 CG 固化/稳定化重金属 污染底泥室内试验研究

廖斯汉¹, 蔡燕燕², 林毅华¹, 廖言丰¹, 李剑峰¹

(1. 福建建工集团有限责任公司, 福建 福州 350025;

2. 华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 为增强地质聚合物(GP)替代水泥(OPC)固化/稳定化重金属污染底泥(污泥)的作用效果。通过引入天然高分子聚合物壳聚糖(CS)改性碱激发矿渣、粉煤灰地聚物合成新型固化剂(CG),并以 OPC 为对照组通过室内试验研究固化/稳定化污泥的无侧限抗压强度、抗氯盐侵蚀、重金属浸出特性以及固化/稳定化机理。结果表明:CG 固化污泥的强度随着 CS 掺量的增加呈先上升后下降的趋势,且在任意龄期下均大于 OPC;在氯盐干湿循环条件下,CG 固化后的污泥强度、质量损失和表观劣化程度均小于 OPC;CG 稳定化重金属作用明显优于 OPC,显著降低了 Cu、Zn 的浸出浓度;GP 会产生大量水化产物来胶结和填充污泥颗粒间的孔隙,形成致密的骨架结构,提升强度。同时,CS 能够形成薄膜状物质团聚污泥颗粒,并且通过吸附、螯合、化学结合和配位等作用,增强了 GP 固化/稳定化污泥的作用效果。

关键词: 地质聚合物;固化/稳定化;重金属污染;无侧限抗压强度;浸出浓度

中图分类号: TU528.7

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2025)02—0025—07

Solidification and Stabilization of Heavy Metal Contaminated Sediment by Modified Geopolymer CG

LIAO Sihan¹, CAI Yanyan², LIN Yihua¹, LIAO Yanfeng¹, LI Jianfeng¹

(1. Fujian Constructian Engineering Group Company Limited, Fuzhou, Fujian 350025, China;

2. School of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen, Fujian 361021, China)

Abstract: To enhance the effect of geopolymer (GP) instead of cement (OPC) on solidification and stabilization of heavy metal contaminated sludge (sludge). Synthesis of new curing agent (CG) by introducing natural high polymer chitosan (CS) modified alkali to stimulate the terpolymers of slag and fly ash, and OPC was used as the control group to evaluate the unconfined compressive strength, chlorine salt erosion resistance, heavy metal leaching characteristics and curing/stabilizing mechanism of solidified/stabilized sludge. The results show that the strength of CG solidified sludge increases first and then decreases with the increase of CS content, and is greater than OPC at any age. The strength, mass loss and apparent deterioration of the sludge after CG curing were less than those of OPC under the condition of chloride dry and wet cycle. The stabilization of heavy metals by CG was better than that by OPC, and the leaching concentrations of Cu and Zn were significantly reduced. GP will produce a large number of hydration products to cement and fill the pores between the sludge particles to form a dense skeleton structure and improve strength. At the same time, CS can form filament-like aggregate sludge particles, and enhance the effect of GP solidification and stabilization of sludge through adsorption, chelation, chemical binding and coordination.

Keywords: geopolymer; solidification and stabilization; heavy metal pollution; unconfined compressive strength; leaching concentration

各因素水平分别为矿渣:粉煤灰(9:1、8:2、7:3、6:4)、碱激发掺量(占矿渣和粉煤灰总质量之比,20%、25%、30%、35%)碱激发模数(溶液中 SiO_2 与 Na_2O 的含量之比,1.0、1.2、1.4、1.6),考虑7 d、14 d、28 d 养护龄期对 GP 固化土无侧限抗压强度的影响。最终确定地质聚合物前驱体的最佳配合比为矿渣 60%,粉煤灰 40%,碱激发剂掺量 25%、模数为 1.4,后续将不再重点分析此配比。

1.2 试验步骤和方法

图 2 展示了改性地聚物(CG)固化/稳定化污泥试样制备步骤图(对照组将 CG 替换成 OPC 即可),将污泥烘干、碾碎、过 2 mm 筛,固定固化剂掺量为 10%(占过筛污泥干粉质量之比),其中 CS 掺量为固化剂质量的占比。按照配合比称取固化剂原材料和过筛污泥,按水灰比为 0.8:1 加入蒸馏水一起放入搅拌机里进行充分均匀搅拌 5 min 以上,然后将混合浆体分 3 层装入直径为 50 mm、高为 50 mm 且内壁涂有凡士林的圆柱形模具,并刮平表面,并置于室内环境养护 24 h 后脱模,再将脱模后的试样放入标准养护箱中养护($22 \pm 2^\circ\text{C}$,95% 相对湿度)。

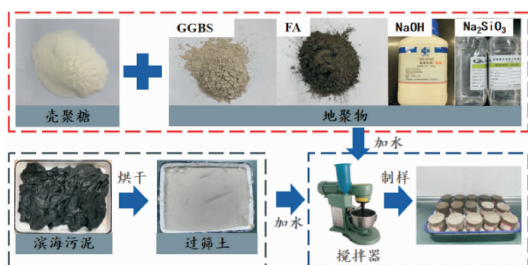


图 2 固化土试样制备流程

采用垂直加载速率为 1%/min 的单轴试验机测定固化土的无侧限抗压强度,具体操作参照《土工试验方法标准》^[23](GB/T 50123—2019);待试样养护至 28 d 时进行氯盐干湿循环试验,将固化土试样分别放置不同浓度溶液中浸泡增湿 12 h,再自然晾干 12 h 构成一次干湿循环,待干湿循环至规定次数后,再进行固化土质量、无侧限抗压强度的测定;重金属浸出试验按照《固体废物浸出毒性浸出方法醋酸缓冲溶液法》^[24](HJ/T 300—2007)进行,壳聚糖掺量为 0%、0.5%、1%、1.5%、2% 和养护龄期 7 d、28 d、90 d 作为变量进行试验;微观试验选取 CS 无侧限抗压强度试验时的新鲜破碎土颗粒(CS 掺量为 1%、养护龄期 28 d),并在无水乙醇中浸泡 24 h 后,取出放入液氮中冷冻而后抽真空,最后表面喷金处理进行扫描电镜试验。具体试验方案计划见表 3 和

表 4。

表 3 无侧限抗压强度试验方案

固化剂名称	壳聚糖掺量/%	养护龄期/d
CG	0、0.5、1、1.5、2	7、14、28、90
OPC	—	

表 4 氯盐干湿循环试验方案

固化剂名称	壳聚糖掺量/%	干湿循环次数	湿化溶液中氯离子含量/%
CG	0、0.5、1、1.5、2	4、8、12、16	0、3.5、7.0
OPC	—		

2 试验结果与分析

2.1 无侧限抗压强度

无侧限抗压强度是评价污染土固化稳定效果的重要力学参数,美国环境保护署(USEPA)建议,用于安全填埋的有害废物的当量应超过 0.35 kPa 或 0.70 kPa^[25]。无侧限抗压强度与 CS 掺量的关系如图 3 所示,由图 3 可知,随着 CS 掺量的递增,固化土的无侧限抗压强度呈现出一种先上升后下降的趋势,这一规律在四个不同的龄期(7 d、14 d、28 d 和 90 d)的 CG 固化土中均有所体现。具体而言,当 CS 的掺量达到 0.5% 时,CG 固化土在 7 d 龄期下展现出其最大强度;而当 CS 的掺量增加至 1% 时,CG 固化土在 14 d、28 d 及 90 d 龄期下的强度均达到峰值。这一现象是适量的 CS 能够与 GP 键合,共同构建起一种胶凝三维网络结构,这种结构能够有效地包裹并填充土体内部的空隙,从而减小土颗粒间的间距并增大接触面积^[26]。此外,CS 骨架所携带的大量碱性官能团对于提升矿渣、粉煤灰的化学活性具有积极作用,通过加快玻璃体相中活性硅酸盐的溶解,进而促进 GP 的水化反应更为彻底,生成更多的水化硅酸钙胶凝使得固化土的整体结构变得更加紧密与稳固。然而,当 CS 的掺量超过一定限度时,它可能会吸收过多的水分,这反而会导致固化反应的不完全进行,进而削弱土壤颗粒之间的粘结力。同时多余的壳聚糖会在固化土中形成过多的孔隙,降低密实度,这些都是导致固化土强度降低的原因。另外,值得强调的是,CG 固化土的强度在 7 d 龄期下就能满足 EPA 强度要求 350 kPa,且均大于 OPC 固化土强度。

无侧限抗压强度与养护龄期的关系如图 4 所示,由图 4 可知,CG 与 OPC 固化土强度随着养护龄期的增加而增大,增长曲线呈现出先陡增后平缓的

整体趋势,这是因为在早期固化剂与土体反应剧烈,能够快速生成新的物质加强土壤颗粒之间的连接,从而快速提高固化土强度,例如 C-S-H、C-A-S-H 等胶凝物质,而后期反应物浓度降低,水分减少以及土颗粒之间空间限制等因素,强度的增长就会变得缓慢。

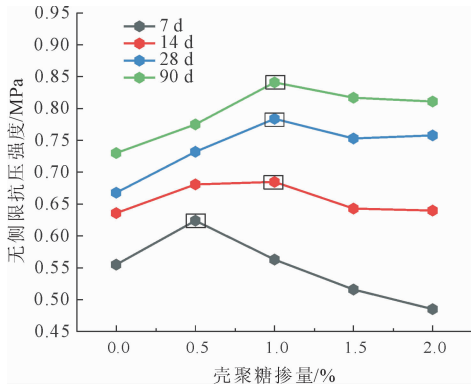


图 3 无侧限抗压强度与 CS 掺量的关系

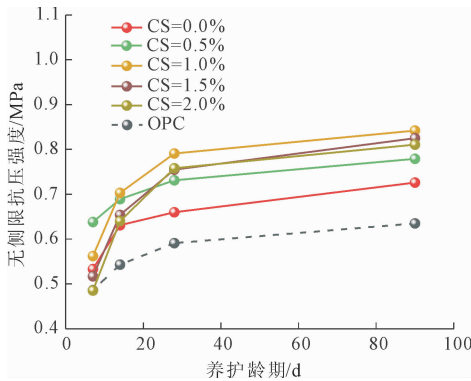
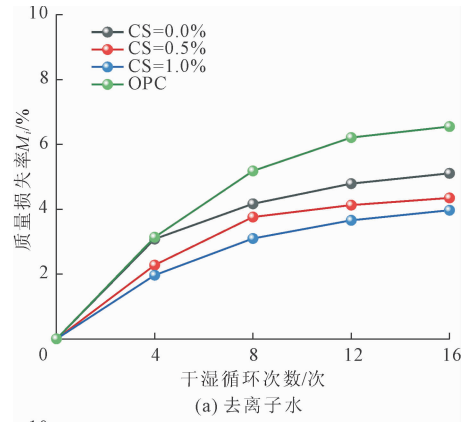


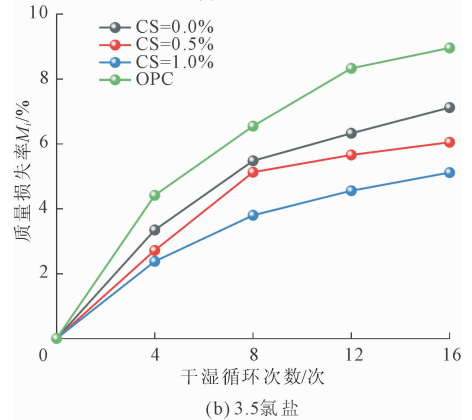
图 4 无侧限抗压强度与养护龄期的关系

2.2 氯盐干湿循环

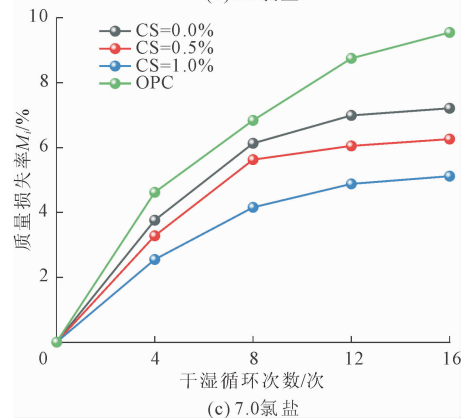
使用强度损失率和质量损失率可以更直观的评价固化土在不同环境下的耐久性以及试样完整性。在不同浓度氯盐干湿循环的影响下,CG 和 OPC 固化土试样的循环次数与质量损失率 M 之间的关系如图 5 所示。由图 5 可知,在相同的氯盐溶液中,随着干湿循环次数的增加,固化土的质量损失率呈现出逐渐上升的趋势,但其增长速率则逐渐放缓。而在相同的循环次数下,CG 固化土的质量损失率随 CS 掺量的增加而有所减少,且始终低于 OPC 固化土的质量损失率。进一步比较三种不同氯盐溶液在干湿循环下的表现,发现固化土的质量损失率随循环次数的增加而增加,呈现一致的规律。而氯盐含量的高低对固化土的质量损失率有显著影响:氯盐含量越高,固化土的质量损失率越大,造成这种现象



(a) 去离子水



(b) 3.5% 氯盐



(c) 7.0% 氯盐

图 5 干湿循环次数与质量损失率的关系

的原因是高含量的氯盐在溶液中容易达到过饱和,导致结晶,这些晶体破坏了固化土壤中的孔隙结构,导致样品表面出现裂缝。虽然溶液中的水分可以通过这些裂缝与一些未水化胶凝材料发生反应,但水化产物的质量增长速度远远低于样品因氯化物盐侵蚀而失去质量的速度。干湿循环次数与强度损失率的关系如图 6 所示,由图 6 可知,对比强度损失率与循环次数的关系,可以观察到在同一溶液中,固化土的强度损失率呈现出与干湿循环次数正相关的趋势。这是因为随着试样在浸泡过程中增湿,水溶液对固化体内的微小裂缝施加压力,导致其扩张,进而使得周围的胶凝产物易于溶解并被破坏,从而引发

强度的损失。此外,不论循环次数如何变化,CG 固化的强度损失始终低于 OPC 固化,特别是在 CG 掺量达到 1.0% 时,CG 固化土的强度损失达到了最小值。同一循环次数下,固化土的强度损失会随着氯盐含量的增加而加剧,这主要是由于氯盐会随着水分的侵蚀渗透到固化土内部,加速了内部结构的扩散过程。并且,氯盐含量越高,这种扩散现象就越为显著,导致内部晶体的溶解速率加快,空隙数量增多,从而加剧了强度的损失。

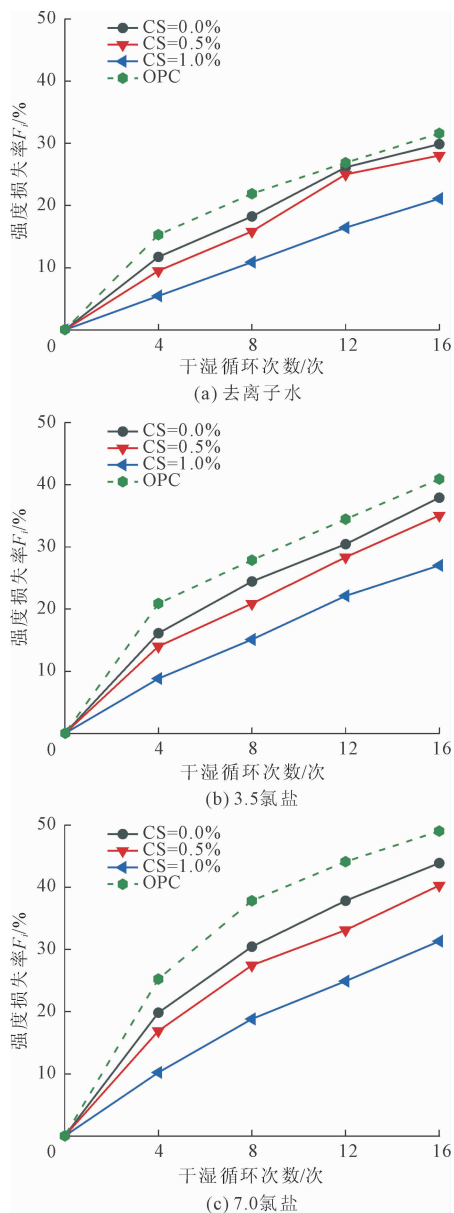


图 6 干湿循环次数与强度损失率的关系

图 7 展示了在掺量为 3.5% 的氯盐溶液侵蚀条件下,CG 和 OPC 固化土的外观形貌劣化程度。在不同循环次数的处理下,固化土试样的外观形貌劣化程度显著不同。从图 7 中可以清晰地观察到,随着循

环次数的逐渐增加,固化土试样表面开始出现少量松散土颗粒的崩落,且表层损失的面积也逐渐扩大,表层损失基本是从两端开始向中间延伸,导致表面由原来的相对平滑逐渐变粗糙,这也直接导致固化土质量的损失。图 7 中还可以发现,CG 固化土在同一氯盐溶液侵蚀下的表观劣化程度均优于 OPC 固化土。OPC 固化土在经历 12 次循环后表层均脱落,伴随着出现小块状脱落、裂隙微膨胀,导致结构变得较为疏松;而 CG 固化土在经历氯盐干湿循环 16 次后仍有部分表层未受损。可见,氯盐干湿循环对 CG 固化土的影响主要表现在表层,而对 OPC 固化土的影响已发展至结构内部;氯盐干湿循环对 OPC 固化土的影响显著大于 CG 固化土。

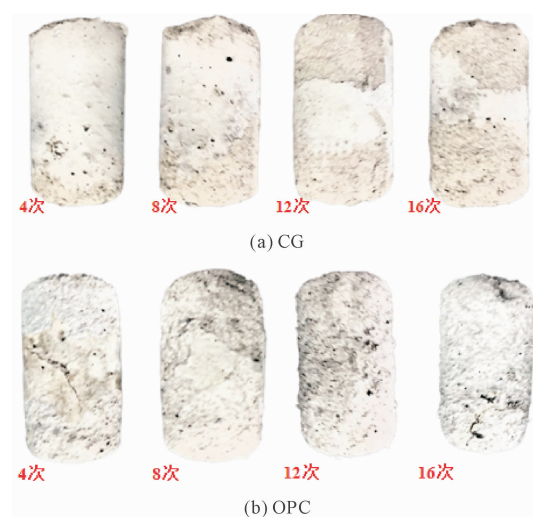


图 7 固化/稳定化污泥干湿循环表观劣化特征

2.3 重金属浸出浓度

固化/稳定化重金属污染土后可作为工程材料投入使用^[27],参照《土壤环境质量标准》^[28](GB 15618—1995)对稳定化重金属污泥效果进行评价,浸出标准采用维护人体健康的二级标准:Cu > 100 mg/kg,Zn > 250 mg/kg。

图 8 为固化/稳定化污泥后重金属 Cu、Zn 浸出浓度,可以看出不同 CS 掺量的浸出效果不同,在不同龄期阶段,随着 CS 掺量的逐步增加,Cu 和 Zn 的浸出浓度均呈现出明显的下降趋势。CS 具备丰富的阴离子官能团,如氨基、羟基等,这些自带吸附性的官能团可以与污泥中的重金属阳离子形成稳定的配合物,因此 CS 通过与重金属阳离子形成配合物,进而将这些重金属离子转化为更为稳定的形态^[29]。这一过程有效地抑制了重金属离子的迁移能力,从而实现了重金属的固封效果,最终导致了重金属浸

出浓度的降低。当 CS 掺量大于 1% 时,由于 Cu^{2+} 在早期对 CG 的水化反应起到了抑制作用,使得 CG 固化土反应不够完全,重金属 Cu 浸出浓度在 7 d 时没有达到标准值,其他养护龄期均达到标准值;重金属 Zn 浸出浓度在 CS 掺量大于 0.5% 四个龄期下均满足标准值,而 OPC 对重金属 Zn 和 Cu 的浸出浓度均不满足标准值要求,此外,重金属浸出浓度还随着养护龄期的增大而降低,这是因为随着时间的增加,固化剂反应越来越少,重金属浓度进一步降低。总体来说,CG 稳定化重金属 Cu、Zn 污泥具有较好的效果。

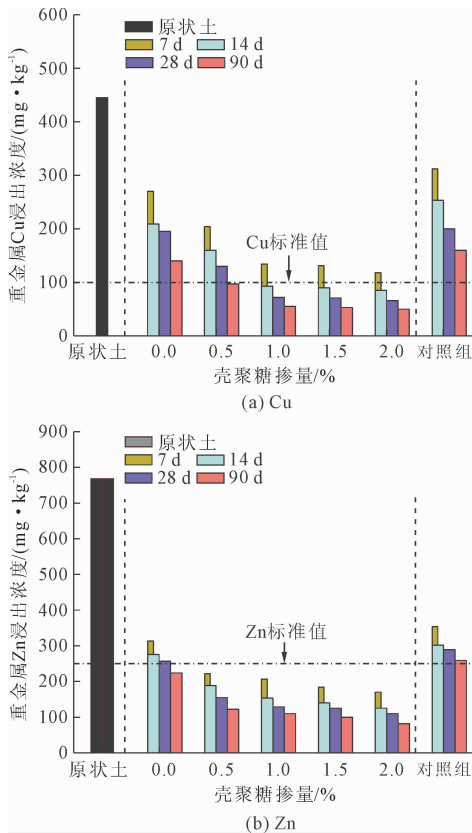


图 8 固化/稳定化污泥重金属浸出浓度

2.4 扫描电镜

图 9 为 CG 固化土和 OPC 固化土在不同放大倍数下获取的扫描电镜图像,对比图 9(a) 原状土,可以明显观察到两种固化土的表面微观结构相较于未固化前更为致密,整体结构性能得到了显著提升。这一现象归因于滨海污泥经过固化处理后,所产生的水化胶凝物质发挥了重要的胶结与填充作用^[30],具体而言,这些胶凝物质不仅包裹住了污泥原有的土颗粒表面,还伴随着部分细颗粒填充到了大颗粒之间的空隙中,从而有效减少了孔隙的数量,缩小了孔隙的尺寸,甚至在某些情况下完全填充了孔隙,进

而显著改善了土体的密实程度。此外,图 9(b) 所示,壳聚糖能够在水化产物上形成一层薄膜状物质,增强了土颗粒之间的粘结力,使得土体的整体性更为牢固。同时,GP 为壳聚糖 -OH (羟基) 和 -NH₂ (氨基) 基团与 Cu/Zn 配合形成稳定的螯合物提供中和环境和功能位点^[31],CG 通过吸附^[32]和螯合作用,有效地将重金属离子固稳在壳聚糖表面上,降低了其迁移性,进一步提升了固化土的环境友好性。从整体结构的致密程度来看,可以得出以下规律:CG 固化土 > OPC 固化土。

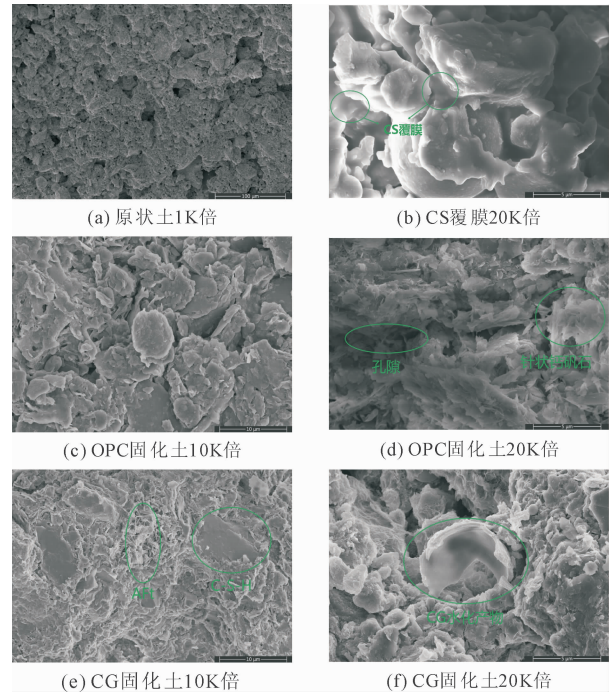


图 9 固化/稳定化污泥的 SEM 图

3 结论

(1) CG 固化/稳定化污泥的无侧限抗压强度随着 CS 掺量的增加先增大后减小,在任意龄期下均满足 EPA 要求强度 350 kPa,且均大于 OPC 固化土的强度。

(2) 相较于 OPC,CG 固化/稳定化后的污泥能够更有效的抵抗氯盐侵蚀,在不同环境下的强度、质量变化率以及表面劣化程度均小于 OPC 固化稳定化后的污泥。

(3) CG 固化/稳定化重金属 Cu 和 Zn 的浸出浓度在 CS 掺量大于 1% 以及达到 14 d 龄期后均满足规定的标准值,Cu < 100 mg/kg 和 Zn < 250 mg/kg。

(4) 固化土强度来源主要是 GP 产生大量的水化产物改善了土体密实程度,同时,CS 能够在部分

孔隙表面附着形成薄膜状物质团聚土颗粒,并通过吸附、螯合、化学结合和配位等作用,增强了 GP 固化/稳定化污泥的作用效果。

参考文献:

- [1] 王 军,王逸杰,刘飞禹,等. 间歇式真空预压联合电渗加固吹填软土试验[J]. 中国公路学报,2016,29(10):37-45.
- [2] Zhu Fusheng, Zhu Fanghua, Xu Long, et al. Laboratory study of strength, leaching, and electrical resistivity characteristics of heavy-metal contaminated soil[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2021,80(5):184.
- [3] 张 莹,刘树芳. 微量元素锌与人体健康[J]. 科技资讯,2019,17(5):253-254.
- [4] 邝臣坤,张太平,万金泉. 城市河涌受污染底泥的固化/稳定化处理[J]. 环境工程学报,2012,6(5):1500-1506.
- [5] 曾映达,程银汉,瞿广飞,等. 固体废物中重金属的固化/稳定化技术研究进展[J]. 环境化学,2023,42(6):2032-2047.
- [6] 郭晓璐,伍 亮,施惠生. 地聚合物耐久性能研究进展及改善途径[J]. 功能材料,2017,48(10):10046-10054.
- [7] 李芳菲,华 渊,刘文化,等. 干湿循环条件下水泥固化疏浚淤泥的物理力学特性[J]. 硅酸盐通报,2019,38(2):344-350.
- [8] 谢 超,王起才,于本田,等. 纳米 SiO₂-矿渣-水泥复合胶凝材料的抗硫酸盐侵蚀试验[J]. 材料科学与工程学报,2020,38(1):88-93.
- [9] 王宏伟,王东星,贺 扬. MgO 改性淤泥固化土压缩特性试验[J]. 中南大学学报(自然科学版),2017,48(8):2133-2141.
- [10] Dassekpo J B, Ning Jiaqian, Zha Xiaoxiong. Potential solidification/stabilization of clay-waste using green geopolymer remediation technologies[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2018,117:684-693.
- [11] 侯云芬,王栋民,周文娟,等. 粉煤灰基矿物聚合物抗硫酸盐溶液侵蚀性能研究[J]. 新型建筑材料,2008(7):41-44.
- [12] Sata V, Sathonsaowaphak A, Chindaprasirt P. Resistance of lignite bottom ash geopolymer mortar to sulfate and sulfuric acid attack[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2012,34(5):700-708.
- [13] 李 霞,邢 峰,刘斯凤. 地聚合物-碱废渣复合胶凝材料抗压强度的影响因素分析(英文)[J]. 硅酸盐学报,2009,37(1):120-124.
- [14] Zhang Mo, Guo Hong, El-Korchi T, et al. Experimental feasibility study of geopolymer as the next-generation soil stabilizer[J]. *Construction and Building Materials*, 2013,47:1468-1478.
- [15] Timakul P, Rattanaprasit W, Aungkavattana P. Improving compressive strength of fly ash-based geopolymer composites by basalt fibers addition[J]. *Ceramics International*, 2016,42(5):6288-6295.
- [16] 樊晋源,姜 屹,王利民,等. 剑麻-PVA 混杂纤维增强地聚物抗硫酸盐侵蚀性能研究[J]. 硅酸盐通报,2020,39(5):1430-1437.
- [17] Silva G, Kim S, Bertolotti B, et al. Optimization of a reinforced geopolymer composite using natural fibers and construction wastes[J]. *Construction and Building Materials*, 2020,258(3):119697.
- [18] Rinaudo M. Chitin and chitosan: Properties and applications[J]. *Progress in Polymer Science*, 2006,31(7):603-632.
- [19] Hataf N, Ghadir P, Ranjbar N. Investigation of soil stabilization using chitosan biopolymer [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018,170:1493-1500.
- [20] Mende M, Schwarz D, Steinbach C, et al. Simultaneous adsorption of heavy metal ions and anions from aqueous solutions on chitosan- Investigated by spectrophotometry and SEM-EDX analysis[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2016,510:275-282.
- [21] 李增新,孟 韵,梁 强,等. 壳聚糖改性沸石吸附废水中的苯酚[J]. 生态环境,2008,17(6):2168-2172.
- [22] Wang Yuexiang, Tang Jie, Li Zhuang. Strength and leaching behavior of heavy metal contaminated sludge solidified/stabilized by compound binders[J]. *Environmental Research*, 2021,197:111053.
- [23] 水利部水利水电规划设计总院. 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
- [24] 国家环境保护总局科技标准司. 固体废物浸出毒性浸出方法醋酸缓冲溶液法: HJ/T 300—2007 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2007.
- [25] Xia Weiyi, Du Yanjun, Li Fasheng, et al. In-situ solidification/stabilization of heavy metals contaminated site soil using a dry jet mixing method and new hydroxyapatite based binder[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2019,369:353-361.
- [26] Ma Qiang, Lei Jingjie, He Jun, et al. Epoxy resin for solidification/stabilization of soil contaminated with copper (II): Leaching, mechanical, and microstructural characterization. [J]. *Environmental research*, 2023, 240(P1):117512.

- 腐蚀钢筋混凝土柱抗震性能评价[J]. 振动与冲击, 2012, 31(10):19-23.
- [3] Alipou A, Asce A M, Shgei B, et al. Performance evaluation of deteriorating highway bridges located in high seismic areas [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2011, 16: 597-611.
- [4] Simon J, Bracci J M, Gardoni P. Seismic response and fragility of deteriorated reinforced concrete bridges[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2010, 136(10):1273-1281.
- [5] 张云鹏. 单调与重复荷载作用下锈蚀钢筋与混凝土间粘结滑移机理及性能[D]. 上海: 同济大学, 2022.
- [6] 彭江衡. 考虑混凝土碳化影响的钢筋腐蚀速率研究[J]. *土木工程*, 2024, 13(11):2073-2080.
- [7] 崔忠圻, 覃耀春. 金属学与热处理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2020.
- [8] L. 贝尔托利尼等著, 李伟华等译. 混凝土中钢筋的锈蚀——预防, 诊断及修复[M]. 北京: 科学出版社, 2020.
- [9] 庄彬彬, 萧超雄, 刘 强, 等. 不同掺合料混凝土与锈蚀钢筋间粘结-滑移力学性能试验研究[J]. *硅酸盐通报*, 2022, 41(8):2767-2773.
- [10] 巩 位, 乔宏霞, 余红发, 等. 基于钢筋锈蚀时变模型的氯氧镁水泥钢筋混凝土初裂时间[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2018, 48(3):519-527.
- [11] 许家琳, 张于晔, 左晓宝. 考虑氯离子侵蚀的预应力节段桥墩时变地震易损性分析[J]. *工程力学*, 2024, 41(S):74-82.
- [12] 周 救, 张 洋, 姜永存, 等. 氯离子侵蚀后桥墩的抗震性能及损伤指标研究[J]. *振动与冲击*, 2022, 41(15):263-272.
- [13] 郑山锁, 田忠祥, 杨 松, 等. 锈蚀钢材力学性能试验及等效本构模型研究[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2024, 51(3):111-120.
- [14] 龚敏锋, 杨 栋, 张 谨. 箍筋约束混凝土本构模型在弹塑性分析中的应用研究[J]. *建筑结构*, 2022, 52(20):45-52.
- [15] 北京金土木软件技术公司. SAP2000 中文版使用指南[M]. 北京: 人民交通出版社, 2012.
- [16] 中国地震动参数区划图: GB18306—2015[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
- [17] 杨纪鹏, 钱 骥, 夏 烨, 等. 基于时程响应分析的区域梁式桥震后状态快速评估[J]. *土木工程学报*, 2023, 56(12):98-109.
- [18] 中交公路规划设计院有限公司. 公路悬索桥设计规范[M]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2015.
- [19] 武芳文, 孟园英, 陈 月, 等. 大跨度斜拉桥地震易损性及可恢复性分析[J]. *西南交通大学学报*, 2020, 55(1):126-133.

(上接第31页)

- [27] 冯亚松, 杜延军, 周实际, 等. 活化钢渣在固化稳定化工业重金属污染土中的应用[J]. *岩土工程学报*, 2018, 40(S2):112-116.
- [28] 土壤环境质量标准: GB 15618—1995[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 1995.
- [29] Weng Zhiyu, Yu Jin, Cai Yanyan, et al. Novel chitosan-enhanced alkali-activated material for remediation of zinc-contaminated coastal mudflat sediment[J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 447:138114.
- [30] 赵彦旭, 向俊燃, 吕擎峰, 等. 碱激发剂对地聚物固化黄土工程特性的影响[J]. *北京工业大学学报*, 2021, 47(6):636-643.
- [31] Preeti P, Anjali P, Kazunori N, et al. Applications of chitosan in environmental remediation: A review[J]. *Chemosphere*, 2020, 266(309):128934.
- [32] 宋俊颖, 何绪文, 黄占斌. 壳聚糖及其衍生物对土壤重金属的稳定化效应[J]. *化工进展*, 2019, 38(9):4308-4319.