

工业废渣种类及掺量对疏浚粉土块体性能影响试验研究

曾佑荣

(福建省交通规划设计院有限公司, 福建 福州 350004)

摘要: 针对疏浚弃土建材资源化利用问题, 分别进行了普通振动成型和半干法压制成型下粉土块体的力学性能对比分析, 在此基础上开展粉煤灰和矿粉不同替代量下(0%、20%、30%、40%和 50%)疏浚粉土块体的抗压强度、劈裂抗拉强度和干缩性能研究。结果表明含泥量为 52%的半干法压制成型疏浚土块体 28 d 抗压强度和劈裂抗拉强度分别达到了 65.5 MPa 和 5.1 MPa, 相对于相同配合比下使用振动成型的试件分别提高了 104.0 %和 183.3 %。粉煤灰和矿粉掺入一定程度降低块体早期强度, 但对后期强度无明显不良影响, 掺有 50%粉煤灰和 50%矿粉的疏浚土块体 120 d 的干缩值较纯硅酸盐水泥的疏浚块体分别降低了 29.7%和 27.1%。粉土块体较普通 C30 混凝土成本降低 42.1%, 经济和社会效益显著。以疏浚粉土为主要原料可以制备路面砖、护面砖等人工块体就近应用于航道整治、道路及市政等工程。

关键词: 疏浚粉土; 人工块体; 力学性能; 干缩

中图分类号: U654

文献标志码: A

文章编号: 2095-7874(2025)03-0070-06

doi: 10.7640/zggwjs202503010

Experimental study on the influence of industrial waste types and dosages on the properties of dredged silt blocks

ZENG You-rong

(Fujian Communications Planning & Design Institute Co., Ltd., Fuzhou, Fujian 350004, China)

Abstract: In response to the issue of resource utilization of dredged waste soil and building materials, a comparative analysis of the mechanical properties of silt blocks was conducted under ordinary vibration molding and semi dry pressing molding. On this basis, the compressive strength, splitting tensile strength, and dry shrinkage performance of dredged silt blocks were studied under different substitution amounts of fly ash and mineral powder (0%, 20%, 30%, 40%, and 50%). The results show that the 28 days compressive strength and splitting tensile strength of the dredging soil block formed by semi dry pressing with a mud content of 52% reach 65.5 MPa and 5.1 MPa, respectively, which are increased by 104.0% and 183.3% compared with the specimens formed by vibration under the same mix ratio. The addition of fly ash and mineral powder reduces the early strength of the block to a certain extent, but has no significant adverse effect on the later strength. The dry shrinkage value of the dredged soil block with 50% fly ash and 50% mineral powder added after 120 days is reduced by 29.7% and 27.1% respectively compared to the dredged block with only Portland cement added. Compared with ordinary C30 concrete, the cost of silt block is reduced by 42.1%, and the economic and social benefits are significant. Using dredged silt as the main raw material, artificial blocks such as road tiles and protective tiles can be prepared for nearby applications in waterway regulation, road and municipal engineering.

Key words: dredging silt; artificial blocks; mechanical properties; dry shrinkage

收稿日期: 2024-06-06 修回日期: 2024-07-26

基金项目: 福建省交通运输科技项目 (202216); 福建省科技厅社会发展引导性项目 (2023Y0041)

作者简介: 曾佑荣 (1983 —), 男, 福建漳平人, 硕士, 高级工程师, 港口、海岸及近海工程专业, 主要从事水运工程规划、设计、咨询及研究工作。

E-mail: 184555653@qq.com

0 引言

港口建设、航道整治等工程带来大量疏浚土，据估计目前我国年产疏浚土超过 10 亿 m^3 。截至 2021 年，全国范围内疏浚土年排放量 100 万 m^3 以上的港口、航道工程与水利工程多达 50 余个。长期以来大量疏浚土作为废弃物抛弃到指定水域或仅做堆置处理，未能有效利用，简单粗放的处理方式不仅造成资源浪费，还对生态环境造成二次污染。随着国家对环境的重视，外抛等方式已经受到限制。对于日益增长的废弃疏浚土，如能进行建材等资源化利用，可以减轻其对环境的影响，间接地节省土地，降低工程造价，有效缓解天然砂石材料短缺和枯竭问题，对推动绿色水运、促进生态保护起到积极作用。

疏浚弃土的资源化利用已经引起研究者的广泛关注。朱伟等^[1]在疏浚淤泥中添加固化材料来提高疏浚淤泥强度的化学方法是一种经济、实用、可行的方法。马时冬^[2]以疏浚淤泥作为原料土，聚苯乙烯泡沫塑料颗粒作为轻质材料，制作泡沫塑料混合轻质土，经过试验测试能够满足路堤土的要求。文国来等^[3]在深圳市坪山河综合整治工程中，将淤泥进行分拣，投入外加剂，脱水制成泥饼，粉碎成细颗粒后加入水泥、砂、石骨料等制作砌块用于河道防护和岸上景观铺设，砌块达到环境保护标准。谢文辉等^[4]在扭王块制作时掺入 11% 疏浚淤泥，制备的扭王块 28 d 抗压强度低于基准混凝土 9%~13%，而抗折强度高于基准混凝土，符合工程要求。Brouwers 等^[5]用水泥和生石灰作为黏合剂固化疏浚污泥，疏浚淤泥混凝土的抗压强度均达到 C35 的强度等级。杨鹏乾等^[6]利用疏浚底泥免烧裹壳骨料作为粗骨料制备混凝土路面砖，通过半干压制法在 10 MPa 的成型压力进行压制成型，保压 1 min，完成压制后覆膜静置 24 h 进行脱模处理，制备的路面砖性能符合相关国家标准。综上所述，目前以疏浚土为主要原料制备高强块体的研究不多，以疏浚土为主要原料制备路面砖、路面砖、压载块等人工块体就近应用于航道整治工程、道路或市政工程，可以大量利用疏浚弃土，为其高附加值建材资源化利用提供有效途径。

疏浚粉土为疏浚土中的一大类，具有孔隙小、结构性差、透水性弱、含毛细水等特点。由于其中有大于 0.075 mm 的颗粒（小于总质量 50 %），

制备块体时粉土中的砂粒可以起到骨架支撑作用，较之主要由细粒、黏粒组成的淤泥更容易发挥大小颗粒相互搭配、彼此镶嵌、紧密堆积等颗粒级配作用，从而提高块体强度以及抵御水分蒸发引起的收缩等提高块体耐久性。但目前未见针对粉土替代砂石料制备块体的专门研究。本文以硅铝质工业废渣粉煤灰、矿粉替代部分水泥，以疏浚粉土替代普通砂石料为主要原料制备人工块体，分别进行普通振动成型和半干法压制成型下粉土块体的力学性能对比分析，在此基础上开展粉煤灰和矿粉不同水泥替代量下（0%、20%、30%、40%和 50%）疏浚粉土块体的抗压强度、劈裂抗拉强度和干缩性能研究，并与普通 C30 混凝土作对比，进行粉土块体的经济分析，为其后续的推广应用奠定基础。

1 试验原材料和方法

1.1 试验原材料

本文疏浚粉土的 pH 值大于 7.15，呈现出微碱性，密度为 2.65 g/cm^3 ，天然含水率为 42.5%，塑性指数 I_p 为 9.5。2 种疏浚粉土中大于 0.075 mm 颗粒含量分别为 48%和 38%，即含泥量分别为 52%和 62%。疏浚土化学成分见表 1（以氧化物形式表达），由表 1 可知疏浚土中主要含 Si、Al、Fe、Ca、Mg、K、Na、Ti、S 等化学元素，其中氧化物成分质量分数达到 99%以上，说明土样中其他物质及有机质含量较少。土样中含有碱性物质，该土样偏碱性。

表 1 疏浚土化学成分

Table 1 Chemical composition of dredged soil

名称	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	SO ₃
疏浚粉土	60.14	16.23	5.78	9.12	3.45	2.12	1.15	0.73	0.08

本文所使用的水泥为海螺水泥有限公司生产的 P·O42.5 普通硅酸盐水泥，水泥比表面积 315.0 m^2/kg 。矿粉为南京梅宝公司 S95 级粒化高炉矿渣粉，比表面积 435 m^2/kg ；粉煤灰为河北冠川新材料科技有限公司生产的 II 级粉煤灰，比表面积 435 m^2/kg 。试验配合比为，水泥：疏浚土=1:2.5，其中矿粉和粉煤灰分别替代水泥 0%、20%、30%、40%和 50%，水含量为干混物料的 15%。

1.2 试验方法

疏浚粉土块体分别采用压制成型和振动成型

方法。压制成型工序首先用万能试验机以 600 N/s 速率加压至 10 MPa, 恒压 2 min, 再以 400 N/s 加压至 15 MPa, 恒压 2 min。同样的配合比, 加入胶凝材料 1% 的聚羧酸高效减水剂条件下进行振动成型。抗压强度、劈裂抗拉强度及干缩检测分别依据 SL/T 352—2020《水工混凝土试验规程》进行。

2 试验结果及分析

2.1 不同成型方式疏浚粉土块体性能对比分析

分别采用半干法压制法和振动成型法对含泥量为 52% 和 62% 的粉土进行压制成型, 矿粉替代量为 30%, 2 种土样制备块体的抗压强度和劈裂抗拉强度试验结果见图 1 和图 2, 半干法压制成型下 2 种土样制备的试件 28 d 抗压强度均超过了 60 MPa。使用压制成型的试件抗压强度和劈裂抗拉强度相对于相同配合比下使用振动成型的试验

组有显著地提高, 含泥量为 62% 的土样试件 28 d 龄期抗压强度和劈裂抗拉强度分别达到了 63.3 MPa 和 4.8 MPa, 相对于相同配合比下使用振动成型的试件分别提高了 116.0% 和 202.1%。含泥量为 52% 的疏浚土块体 28 d 抗压强度和劈裂抗拉强度分别达到了 65.5 MPa 和 5.1 MPa, 相对于相同配合比下使用振动成型的试件分别提高了 104.0% 和 183.3%。含泥量高、细度小、颗粒级配不均的疏浚土采用半干法压制成型, 在化学和机械力的双重作用下, 有助于试件固化更快, 强度更高, 并且不需要用减水剂, 有利于进一步降低成本。在加压作用下, 成型压力的增大可促进疏浚土中砂粒骨料颗粒间的相互运动, 排出内部空气, 减小孔隙率。同时, 水泥浆失去稳定状态而流动, 填满骨料间空隙, 骨料结合更紧密。

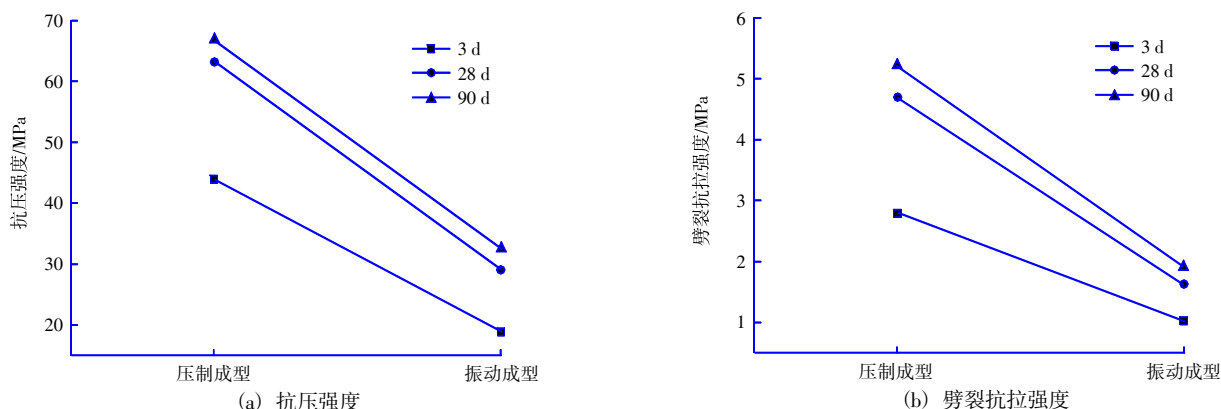


图 1 基于压制成型和振动成型含泥量为 62% 土样水泥基材料强度

Fig. 1 Strength of cement-based materials with a clay content of 62% based on compression molding and vibration molding

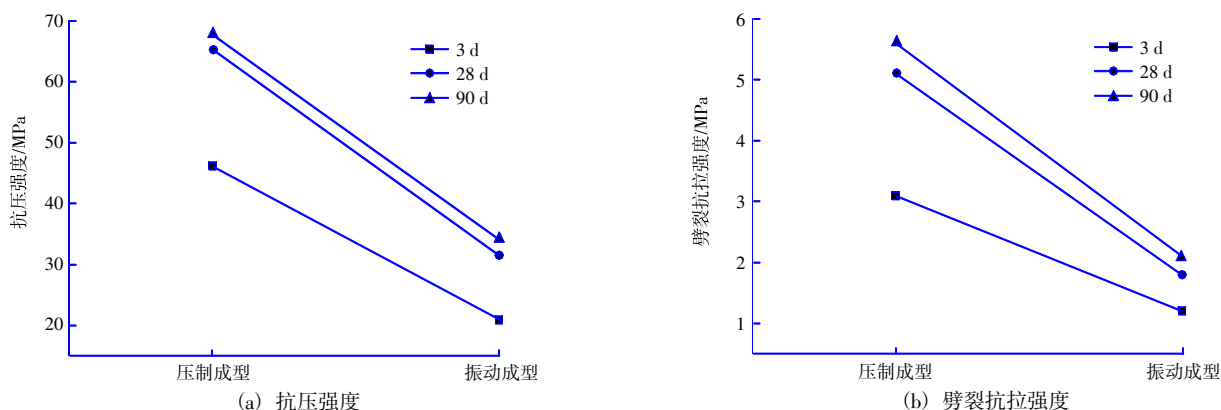


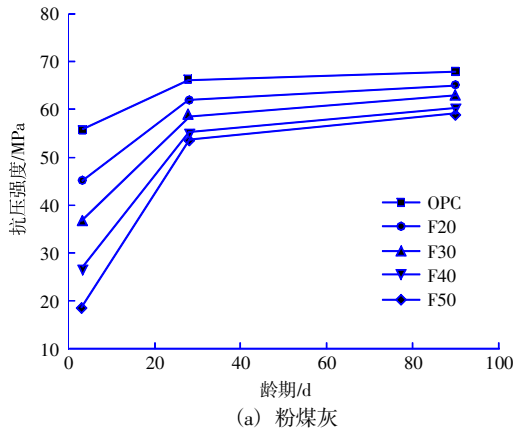
图 2 基于压制成型和振动成型含泥量为 52% 土样水泥基材料强度

Fig. 2 Strength of cement-based materials with a clay content of 52% based on compression molding and vibration molding

对比图 1、图 2 可知含泥量为 52% 土样 28 d 压制成型试件抗压强度和劈裂抗拉强度较之含泥量为 62% 土样压制成型分别提高 3.4% 和 6.2%。

在高含泥量情况下, 含泥量越高, 抗压强度和劈裂抗压强度越低。含泥量较低时, 细颗粒受压力作用填充内部孔隙, 优化材料内部结构, 强度得

以增长。但当含泥量过高时,随着含泥量的增加,细颗粒包裹在骨料表面,阻隔了骨料与水泥接触,骨料与水泥之间的黏结力也被降低了。同时,多余的土体细颗粒聚集在一起,这一部分细颗粒聚集后强度很低,从而导致试件强度的下降。



2.2 不同粉煤灰、矿粉掺量抗压强度及劈裂抗拉强度

以 52% 含泥量的粉土开展研究,粉煤灰、矿粉对不同龄期粉土块体抗压强度影响和劈裂抗拉强度影响见图 3 和图 4。

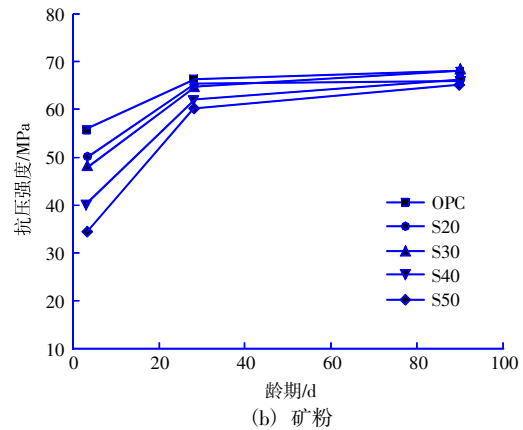


图 3 粉煤灰和矿粉掺量对粉土块体抗压强度影响

Fig. 3 Influence of different FA and GGBS content on compressive strength of dredged silt blocks

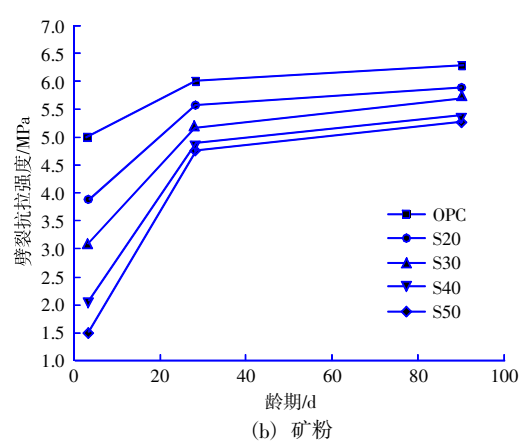
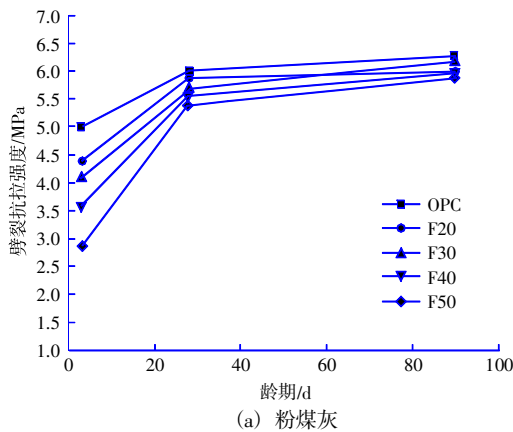


图 4 粉煤灰和矿粉掺量对粉土块体劈裂抗拉强度影响

Fig. 4 Influence of fly ash and mineral powder content on the splitting tensile strength of silt blocks

图 3 和图 4 中 OPC 代表普通硅酸盐水泥, F20、F30、F40、F50 分别代表粉煤灰掺量为 20%、30%、40%、50%, S20、S30、S40、S50 分别代表矿粉掺量为 20%、30%、40%、50%。从图中可知随着养护龄期延长,不同配方试件的抗压强度逐步增加,未发现强度倒缩的现象。粉煤灰和矿粉替代量为 0% 的疏浚土块体 3 d、28 d 和 90 d 抗压强度分别为 55.6 MPa、66.1 MPa 和 67.5 MPa。与水泥相比,粉煤灰早期活性较低,水化反应慢,加入粉煤灰后,所有龄期的抗压强度都有所降低,尤其是早龄期(3 d)强度下降尤为明显,掺量为 50% 粉煤灰的块体最低,抗压强度为

18.9 MPa。但掺加粉煤灰后,试件 28 d 龄期后强度仍有较大幅度的增长。矿粉和粉煤灰类似,也大幅降低了早期(3 d)强度,但降低的幅度小于相同掺量粉煤灰疏浚土块体。掺有 50% 粉煤灰和 50% 矿粉的疏浚土块体 28 d 抗压强度分别达 53.9 和 60.2 MPa。矿粉的活性高于粉煤灰,水化反应至 28 d 时,含矿粉疏浚土块体强度略低于纯硅酸盐水泥的疏浚土块强度,至龄期 90 d 时,强度已与硅酸盐水泥几乎一致。试验所用疏浚土中砂的含量为 38% 左右(即小于 0.075 mm 的泥含量大概 62% 左右),较小的颗粒填充到大颗粒的孔隙中,砂子作为骨料起到了一定的支撑作用,浆体

硬化以后体积收缩,微收缩的浆体对骨料产生各方面的均匀压力,使得浆体能够更好地承受外荷载。矿物掺和料填充以后,胶凝材料系统的颗粒粒径分布被改变,原本的大孔径的孔隙被消除,孔的分布更加合适均匀,形成的凝胶体数量也增多了,水化产物在整个界面过渡层内分布趋于均匀,能够有效提高块体的抗压强度^[7]。

2.3 干缩性能

粉煤灰、矿粉对疏浚土块体的干燥收缩率的影响试验结果见图5。从图5可知,掺有粉煤灰和矿粉的疏浚块体干燥收缩曲线在10 d内基本一致,差异并不大,矿粉和粉煤灰的加入均能减小

疏浚块体在后期的干缩。随着龄期的增加,掺有粉煤灰的疏浚块体在20 d后干缩开始减缓,而未掺粉煤灰的疏浚块体在20 d后干缩仍然在增长,直到40 d后干缩才开始减缓。掺有粉煤灰的疏浚块体的干缩小于没有掺粉煤灰疏浚块体的干缩,掺有20%、30%、40%、50%粉煤灰的疏浚块体在120 d干缩值较纯硅酸盐水泥的疏浚块体分别降低了12.1%、16.2%、27.1%、29.7%,这说明粉煤灰掺量较高时对干缩的抑制效果更为显著。刘建忠等^[8]也发现随着粉煤灰和矿粉掺量的增加,低水胶比混凝土的干缩明显减小,并且粉煤灰和矿粉相比,粉煤灰对减小混凝土干缩的效果更好。

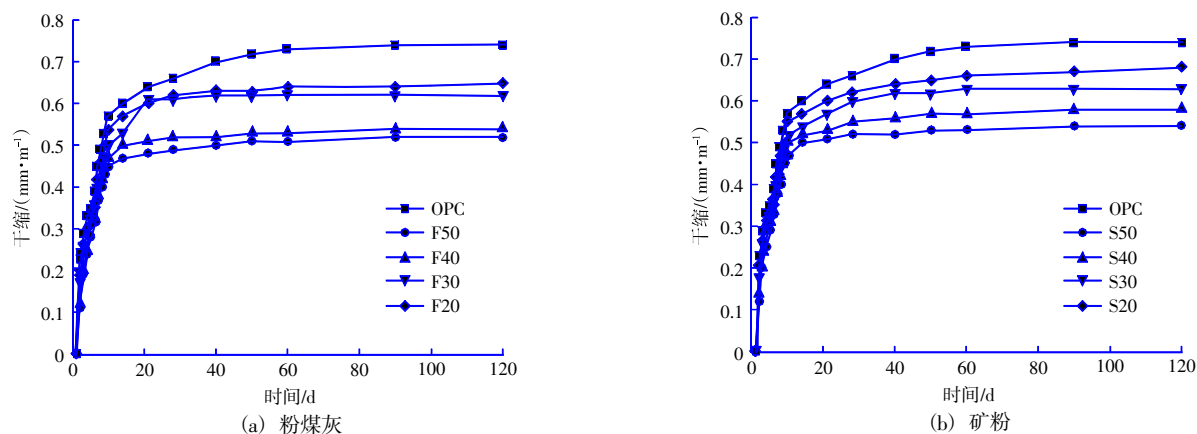


图5 粉煤灰和矿粉掺量对疏浚土块体干缩影响

Fig. 5 Influence of fly ash and mineral powder content on the dry shrinkage of dredged soil blocks

掺矿粉的疏浚土块体干缩小于未掺矿粉疏浚块体的干缩,掺20%、30%、40%、50%矿粉的疏浚块体在120 d的干缩值较纯硅酸盐水泥疏浚块体分别降低了8.1%、14.8%、21.6%、27.1%,这说明矿粉掺量较高时对干缩的抑制效果更为显著。主要原因是矿粉的大量掺入降低了块体在干燥条件下的水分蒸发,矿粉掺入后细化了浆体孔结构同时降低了孔隙连通性,干燥条件下水分迁移更

难,从而内部水分的移动和表面水分的蒸发都减少了,有利于减少块体的干缩^[9]。

2.4 经济分析

以疏浚粉土替代普通砂石料,以矿粉或粉煤灰替代50%水泥制备人工块体,与普通C30混凝土相比,进行疏浚粉土块体单方造价计算。疏浚土上岸费为30元/t,普通C30混凝土和疏浚粉土块体单方材料费对比见表2。

表2 普通C30混凝土和粉土块体单方材料费对比

Table 2 Comparison of the cost per cubic volume of ordinary C30 concrete and silt block

材料	组分	单方用量	单价	合计/(元·m ³)
普通 C30 混凝土	42.5 水泥	298 kg	440 元/t	394.7
	Ⅱ级粉煤灰	53 kg	220 元/t	
	石子	0.84 m ³	180 元/m ³	
	砂	0.50 m ³	200 元/m ³	
	水	175.5 kg	4 元/t	
疏浚粉土块体	42.5 水泥	280 kg	440 元/t	228.0
	疏浚粉土	1 400 kg	30 元/t	
	Ⅱ级粉煤灰(或 S95 矿粉)	280 kg	220 元/t	
	水	294 kg	4 元/t	

由表2可知,粉土块体较之普通C30混凝土成本降低42.1%,具有显著的经济效益。同时由于水泥为高排放行业,其CO₂排放占全球各行业的7%,以粉煤灰、矿粉大掺量替代普通水泥,可以显著降低碳排放,降低成本,在具有经济效益的同时,生态和社会效益显著。

3 结语

1) 在对疏浚土颗粒级配、化学成分等物理化学特性分析基础上,以疏浚粉土为主要原料分别采取普通振动成型和半干法压制成型的方法制备块体,结果表明含泥量为52%的疏浚土块体28d压制成型试件抗压强度和劈裂抗拉强度分别达到了65.5 MPa和5.1 MPa,相对于相同配合比下使用振动成型的试件分别提高了104.0%和183.3%。含泥量为52%土样28d压制成型试件抗压强度和劈裂抗拉强度比含泥量为62%土样压制成型分别提高了3.4%和6.2%。粉土孔隙小、结构性差、压缩性大,半干法压制成型的机械力有助于排出土体内部空气,减小孔隙率,使其密实成型从而有效提高高含泥量疏浚粉土块体的强度。

2) 粉煤灰和矿粉掺入一定程度降低块体早期强度,但对后期强度无明显不良影响。掺有50%粉煤灰和50%矿粉的疏浚土块体28d抗压强度分别达53.9和60.2 MPa。同时,矿粉和粉煤灰均有效降低块体的干缩,掺有20%、30%、40%、50%粉煤灰和矿粉的疏浚土块体在120d的干缩值较纯硅酸盐水泥的疏浚块体分别降低了12.1%、16.2%、27.1%、29.7%,以及8.1%、14.8%、21.6%、27.1%。

3) 以废弃疏浚土为主要原料,以粉煤灰、矿粉等工业废渣大掺量替代普通高能耗水泥,通过半干法压制成型制备护面砖、路面砖、压载块等人工块体就近应用于航道整治工程、道路或市政工程可以大量利用疏浚土,有效使用粉煤灰等工业废渣,降低水泥用量,降低碳排放,本研究可为废弃疏浚土的高附加值利用提供参考和借鉴。

参考文献:

[1] 朱伟,张春雷,刘汉龙,等.疏浚泥处理再生资源技术的现状[J].环境科学与技术,2002(4):39-41,50.

ZHU Wei, ZHANG Chun-lei, LIU Han-long, et al. The status quo of dredged spoils utilization[J]. Environmental Science & Technology, 2002(4): 39-41, 50.

[2] 马时冬. 聚苯乙烯泡沫塑料轻质填土(SLS)的特性[J]. 岩土力学, 2001(3): 245-248, 314.

MA Shi-dong. The properties of stabilized light soil (SLS) with expanded polystyrene[J]. Rock and Soil Mechanics, 2001(3): 245-248, 314.

[3] 文国来, 马永志, 王婷. 河道清淤及淤泥制混凝土砌块技术-以深圳坪山河综合整治工程为例 [J]. 环境工程, 2018, 36(12): 34-37, 42.

WEN Guo-lai, MA Yong-zhi, WANG Ting. Urban river dredging and sludge-cement blocks making: A case study of the Pingshan River[J]. Environmental Engineering, 2018, 36(12): 34-37, 42.

[4] 谢文辉, 李阳, 韦应新. 利用深水航道疏浚泥制作扭王块研究 [J]. 建筑科技, 2018, 2(1): 61-65.

XIE Wen-hui, LI Yang, WEI Ying-xin. The study of manufacturing accoropode with dredging mud from deep water channel[J]. Building Technology, 2018, 2(1): 61-65.

[5] BROUWERS H, AUGUSTIJN D, KRIKKE B, et al. Use of cement and quicklime to accelerate ripening and immobilize contaminated dredging sludge[J]. Journal of Hazardous Materials, 2007, 145(1-2): 8-16.

[6] 杨鹏乾, 安新茹, 彭瑜洲, 等. 疏浚底泥免烧裹壳骨料混凝土路面砖的性能研究[J]. 新型建筑材料, 2018, 45(7): 93-97, 104.

YANG Peng-qian, AN Xin-ru, PENG Yu-zhou, et al. Study on performance of concrete pavement brick with dredged sediment non-sintered wrap shell aggregates[J]. New Building Materials, 2018, 45(7): 93-97, 104.

[7] 龚建清. 超高性能混凝土的级配效应研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2008.

GONG Jian-qing. Study on grading effects of ultra-high performance concrete[D]. Changsha: Hunan University, 2008.

[8] 刘建忠, 孙伟, 缪昌文, 等. 矿物掺合料对低水胶比混凝土干缩和自收缩的影响[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2009, 39(3): 580-585.

LIU Jian-zhong, SUN Wei, LIAO Chang-wen, et al. Effect of mineral admixture on drying and autogenous shrinkage of concrete with low water-to-binder ratio[J]. Journal of Southeast University(Natural Science Edition), 2009, 39(3): 580-585.

[9] 田倩. 低水胶比大掺量矿物掺合料水泥基材料的收缩及机理研究[D]. 南京: 东南大学, 2006.

TIAN Qian. Shrinkage and the mechanism of the cement-based material at low water to binder ratio incorporating high volume mineral admixtures[D]. Nanjing: Southeast University, 2006.