



不同含泥量疏浚土压制成型块体 性能试验研究*

覃昌佩¹, 汪路瑶¹, 马伦兵¹, 江朝华²

(1. 广西交通设计集团有限公司, 广西南宁 530022; 2. 河海大学, 教育部疏浚中心, 江苏南京 210098)

摘要: 针对含泥量对人工块体性能影响规律问题, 以疏浚土替代普通砂石料制备人工块体, 基于半干法压制成型进行不同含泥量(98%、62%、52%、28%、18%、13.3%、5.3%和1.3%)对块体力学性能的影响试验研究, 以及压制强度、成型水分及养护条件对疏浚土块体性能影响研究。结果表明, 含泥量 13.3%~98.0% 的范围内, 试件强度随着含泥量的增加先增大后减小, 在 52% 含泥量时达到最大强度, 其 28 d 抗压强度和劈裂抗拉强度分别为 65.5 和 7.13 MPa; 在一定范围内提高压制强度对提高试件强度的效果明显, 含水率为 13% 时试件强度最大; 温度和湿度对试件强度有较大影响, 标准养护较之定期洒水、自然养护试件强度高。含泥量 52% 的疏浚土试件标准养护和定期洒水养护的软化系数分别达 0.94 和 0.92, 具有良好的抗水侵蚀特性。研究成果可为淤泥、粉土、粉砂等不同类型疏浚土制备人工块体提供参考和借鉴。

关键词: 疏浚土块体; 压制成型; 力学性能

中图分类号: U616

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)11-0013-06

Experimental study on properties of compacted blocks of dredged soil with different mud contents

QIN Changpei¹, WANG Luyao¹, MA Lunbing¹, JIANG Chaohua²

(1. Guangxi Communications Design Group Co., Ltd., Nanning 530022, China;

2. Dredging Center of Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: This article addresses the issue of the influence law of mud content on the performance of artificial blocks and conducts studies of the influence of different mud contents (98%, 62%, 52%, 28%, 18%, 13.3%, 5.3%, and 1.3%) on the mechanical properties of artificial blocks prepared by replacing ordinary sand and gravel with dredged soil based on semi-dry compression molding and it also investigates the effects of parameters such as compression strength, molding moisture, and curing conditions on the mechanical properties of dredged soil blocks. The results show that within the range of 13.3%–98.0% clay content, the strength of the specimens increase first and then decrease with the increase of clay content, and the maximum strength is reached when the clay content is 52% and its 28-day compressive strength and splitting tensile strength are 65.5 and 7.13 MPa respectively. Increasing the compressive strength within a certain range has a significant effect on improving the strength of the specimen and the maximum strength of the specimen is achieved when the moisture content is 13%. Temperature and humidity have a significant impact on the strength of specimens, and standard curing has higher strength compared to regular watering and natural curing. The softening coefficients of the standard curing and regular watering curing of the compacted specimens of dredged soil with a mud content of 52% reach 0.94 and 0.92, respectively, so that it has good characteristics of resisting water erosion. The research results can provide reference and guidance for the preparation of artificial blocks from different types of dredged soils such as silt, silty soil and silty sand.

Keywords: dredged soil block; compression molding; mechanical properties

收稿日期: 2025-02-24

*基金项目: 广西重点研发计划项目(2024AB08080)

作者简介: 覃昌佩(1976—), 男, 博士, 高级工程师, 从事港口与航道工程设计和研究工作。

我国年产疏浚土超过 10 亿 m^3 ，为世界第一疏浚大国。如何合理、有效、环保地利用疏浚土资源，使其发挥积极的作用，已经成为水运行业亟待解决的新问题^[1]。以疏浚土替代普通砂石料制备路面砖、压载块等人工块体，就地、就近利用，可以消纳大量弃土，减轻航道整治或港口建设等对环境的影响，间接节省土地，降低工程造价，有效缓解天然砂石材料的短缺和枯竭，对推动绿色交通、促进生态保护、建设生态航道具有重要意义。

疏浚土资源化利用近几年已成为热点问题。疏浚土的主要类型为粉细砂、粉土和淤泥等，其中占比最多的疏浚淤泥含水率高、压缩性大、强度低，工程利用困难。疏浚淤泥烧结成砖经济高效。Baruzzo 等^[2]通过试验探讨了疏浚泥烧制陶瓷砖的可行性。Mezencevova 等^[3]以疏浚泥作为唯一原料或代替 50% 黏土开展试验，结果表明，制备的烧结砖基本满足工程要求，也符合美国材料实验协会 ASTM 建筑用砖标准。但高温下烧结会产生二次污染，该方式逐渐受到限制。杨鹏乾等^[4]利用疏浚泥免烧裹壳骨料作为粗骨料通过半干法压制成型制备路面砖，制品性能符合相关国家标准。以疏浚土为原料制备免烧砖等，生态效益显著，具有广阔的应用前景。冯明等^[5]以长江下游超细粉细砂为原料，结合周边硅铝质工业废渣，常温制备聚合物胶凝材料替代水泥制备路面砖，结果表明护面砖 28 d 强度超过 30 MPa，干缩小，后期强度不倒缩。谢文辉等^[6]掺入疏浚淤泥制作扭王块，发现在疏浚泥掺入比例达 11% 时，扭王块产品符合工程要求，尽管疏浚泥混凝土的 28 d 抗压强度低于基准混凝土 9%~13%。Brouwers 等^[7]用水泥和生石灰固化疏浚污泥，结果表明，水泥和生石灰能够固化污泥里有害成分，固化后的疏浚泥可以作为建筑材料使用土。

研究表明，含泥量对混凝土等块体性能有显著不良影响。由于泥的比表面积较大，吸附较多水泥浆，导致砂石骨料表层水泥浆减少，降低水泥石本身及其与骨料间的黏结强度，随着含泥量

的增加，混凝土性能显著下降^[8-10]。因此，以高含泥量疏浚土制备可以替代普通混凝土的人工块体，需要解决其高压缩性实现高含泥量疏浚土密实成型等问题，有效解决高含泥量对块体性能的不良影响。本文以高含泥量疏浚土替代普通砂石料制备人工块体，探讨不同含泥量对块体力学性能的影响规律，以及压制强度、含水率、养护条件等参数对疏浚土块体性能的影响，旨在为实现高含泥量疏浚土的高附加值建材化利用提供有效途径。

1 试验原材料及方法

1.1 试验原材料

疏浚土的土样来自北部湾，pH 值大于 7.15，呈现微碱性。土样密度 1.59~1.92 g/cm^3 ，天然含水率 60.3%~68.4%，干密度 0.99~1.14 g/cm^3 。试验所用疏浚淤泥试样的密度为 1.84 g/cm^3 、天然含水率为 68.3%；疏浚粉土试样的密度为 2.65 g/cm^3 ，天然含水率为 42.5%；研究所用疏浚淤泥小于 0.075 mm 的颗粒含量超过 98.0%，疏浚粉土大于 0.075 mm 颗粒含量为 38.0%，即含泥量为 62.0%，其中黏粒含量为 14.0%。所取疏浚淤泥和疏浚粉土的塑性指数 I_p 分别为 43.0 和 9.5。

所用水泥为海螺水泥有限公司生产的 PO42.5 普通硅酸盐水泥，水泥比表面积 315.0 m^2/kg 。水泥性能满足 GB 175—2007《普通硅酸盐水泥执行国家标准》要求。矿粉为南京梅宝公司 S95 级粒化高炉矿渣粉，密度为 2 870 kg/m^3 ，勃氏比表面积为 425 m^2/kg 。

1.2 试验方法

疏浚土块体的制备采用半干发压制成型方法进行。压制成型程序：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。分别检测试件 3、28、90 d 的抗压强度和劈裂抗拉强度。

根据 SL/T 352—2020《水工混凝土试件规程》，采用 SHT4305 微机控制的电液伺服万能试验机上进行疏浚土块体的抗压和劈裂抗拉强度检测。均

匀地施加载荷 0.3~0.5 MPa/s, 直到试样断裂, 并记录失效载荷, 每组试件 3 块。根据 GB-T 4111—2013《混凝土砌块和砖试验方法》进行抗水侵蚀性能检测, 每组试件 6 块, 养护至 28 d 后, 其中 3 块浸在水中 4 d 后检测抗压强度, 另外 3 块直接进行抗压强度检测, 两者的比值为软化系数。试件压制成型后即刻脱模型养护, 分别采用标准养护(温度 20℃±2℃、湿度 95%±5%)、自然养护(在室外, 用草帘、薄膜覆盖防止水分蒸发养护 14 d)和定期洒水(在室内通过人工定期洒水保持湿润的养护方式养护 14 d)至规定龄期进行力学和耐久性检测。

1.3 试验方案

在含泥量对压制成型试件力学性能的影响研究中, 选取含泥量分别为 98%(原状土)、62%(原状土)、52%(配制)、28%(配制)、18%(配制)、13.3%(配制)、5.3%(配制)和 1.3%(配制)的疏浚土, 在胶凝材料与疏浚土的比例为 1:2.5 的情况下, 矿粉替代量为 30%, 进行试件 3、28、90 d 抗压和劈裂抗拉强度检测。在此基础上, 分别进行不同压制强度(5、10、15、20、25、30 MPa)、不同含水率(10%、11%、12%、13%、14%、15%)、以及不同养护方式对疏浚土块体性能的影响研究。

2 试验结果及分析

2.1 不同含泥量对试件力学性能的影响

3、28、90 d 抗压和劈裂抗拉强度试验结果见图 1。含泥量为 5.3%、1.3% 的两组土样, 由于砂粒比较松散, 在最终压制强度 15 MPa 下, 或压制后静置 120 min 以及加入碳酸锂等早强剂静置 120 min 条件下均不能成型, 试件脱模即破坏。主要原因为含泥量过少时, 试件松散无黏结力, 细颗粒较少, 压制时物料间空隙不能被细颗粒所填充, 没有足够的黏结力, 成型后产生分层与裂隙, 从而导致试件内部容易产生裂缝而无法压制后即刻有效成型。

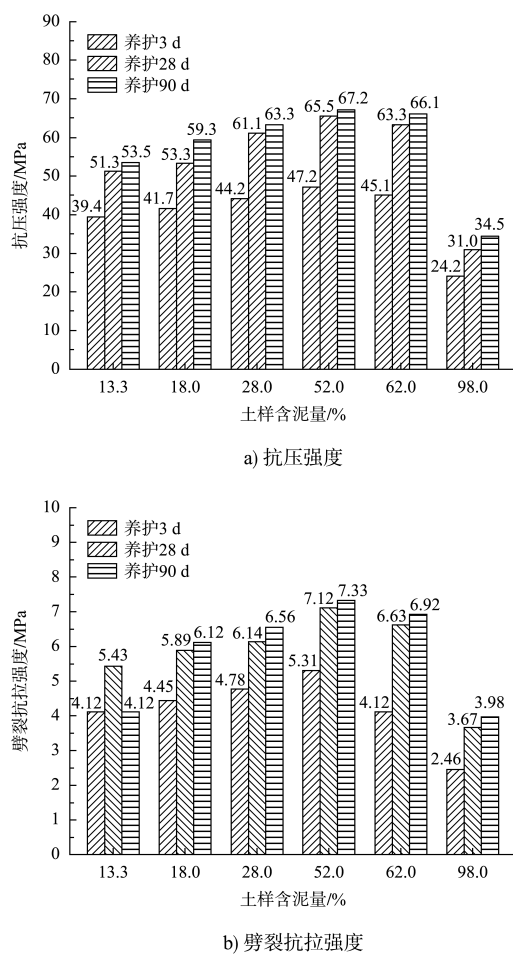


图 1 压制成型下不同含泥量土样的强度
Fig. 1 Strength of soil samples with different clay contents under compression molding

从图 1 可以看出, 在含泥量 13.3%~98% 的范围内, 试件强度随着含泥量的增加呈先增后减的趋势, 在土样含泥量为 52% 左右时强度达到最大。较之含泥量 62% 的土样试件, 含泥量 52% 土样试件 28 d 抗压和劈裂抗拉强度分别提高 3.4% 和 7.4%, 对于含泥量高、细度小、颗粒级配不均衡的疏浚土采用压制成型, 机械力可促进疏浚土块体骨料颗粒间的相互运动, 排出内部空气, 减小空隙率, 在压力作用下, 黏土颗粒与物料接触更加紧密, 依靠分子间的吸引力相黏结。此外, 高压将试件中的空气挤压出来, 减少气孔的数量, 排出部分多余水分, 粗骨料与粗骨料之间的孔隙被胶凝材料和细骨料所补充。在对试件施加压力时, 物料之间接触更加紧密, 能够促进水化反应, 并且疏浚土细颗粒填充内部孔隙, 强度得以增长。含泥量越高, 细小的黏土颗粒在水分迁移和持续

的高压作用下不断补充试件内部的孔隙,依靠分子与分子之间的范德华力,产生了自然的黏结性,从而拥有更高的强度。但当含泥量超过一定限度时,随着含泥量的增加,细颗粒包裹在骨料周围,骨料和水泥被阻隔。同时,多余的细颗粒聚集在一起,这一部分细颗粒聚集后强度很低,从而导致试件强度的降低。

2.2 不同含泥量对试件密度的影响

压制成型下不同含泥量疏浚土块体的密度见图 2,可以看出块体的密度随着含泥量的增加呈现先增加后减小的趋势,在含泥量为 52% 时块体密度达到最大,这一趋势与抗压强度的变化相一致。

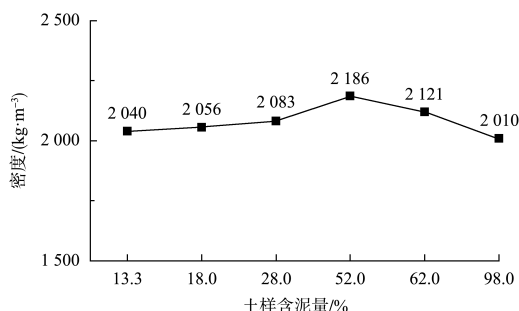


图 2 压制成型下不同含泥量疏浚土块体的密度

Fig. 2 Density of dredged soil blocks with different mud contents under compression molding

疏浚土块体的密度与颗粒级配有着密切的关系,含泥量越高,细颗粒随着水分移动而移动,同时受到压力作用,细颗粒不断被推向物料之间的孔隙中,大小颗粒相互搭配,彼此镶嵌,改善了块体的孔隙结构。在压制过程中,通过施加压力排出拌合料中的空气,减少气孔的数量,排出部分多余水分,分子之间相互吸引,使得疏浚土块体具有更高的密度。但含泥量过高时,粗颗粒会被细颗粒拨开,导致整个体系的孔隙率反而上升,从而引起密度的下降。

2.3 疏浚土块体抗水侵蚀耐久特性

对含泥量 62% 的原状土试件进行疏浚土块体抗水侵蚀性能检测,养护至 28 d 龄期的 6 个试件中的 3 个放入水中浸泡 3 d 后,测定其抗压强度,即抗水侵蚀强度,结果见表 1。

表 1 疏浚土块体抗水侵蚀特性

Tab. 1 Characteristics of dredged soil block against water erosion

成型方式	28 d 抗压强度/MPa	28 d 抗水侵蚀强度/MPa	软化系数
标准养护	63.5	59.7	0.94
定期洒水养护	61.5	56.6	0.92

从表 1 中可以看出,疏浚土块体具有较好的抗水侵蚀性。含泥量 62% 的土样,试件标准养护和定期洒水养护的的软化系数分别达到了 0.94 和 0.92,抗水侵蚀性能较好。压制成型通过挤出拌合物中包裹的空气,减少气孔的数量和体积,排出部分多余水分,消除浆体因化学收缩引起的部分微裂缝等多重作用,有效提高块体密实度和强度,从而提高疏浚土块体抗水侵蚀耐久性。

2.4 成型参数对疏浚土块体性能影响

2.4.1 压制强度

不同压制强度下试件强度的变化见图 3,可以看出,随着压制压力的增加,试件的抗压和劈裂抗拉强度均增大。压力为 15 MPa 时,试件的抗压强度比压力为 10 MPa 时提高 29.7%;压制强度为 20 MPa 时,较之 15 MPa,试件的抗压强度提高 4.3%。在压制强度为 15 MPa 之前,试件强度随着压制强度的增加增长较快;15 MPa 之后,试件强度增长较为缓慢。压制试件的初期强度是从材料成型过程中获得的,即在高压下疏浚土颗粒间紧密接触,依靠分子与分子之间的范德华力,产生了自然的黏结性,从而拥有更高的强度。机械力的作用使得颗粒与颗粒之间的接触面积变大,增大了颗粒之间的物理化学反应速率,这让材料初期强度得到增大,也为后期强度的形成提供了条件。在压制成型的过程中,随着压制强度的增加,颗粒和颗粒之间相互挤压,颗粒之间的接触面积变大,而骨料的外型并不规则,相互之间能形成牢固的“嵌锁结构,颗粒之间咬合得更加紧密,从而增加试件的强度;超过 15 MPa 后,压力对抗压强度的增加效果已经不再明显,当骨料达到最大致密度后,再继续增加压力将难以压实骨料,还可能会由于压力太大骨料被压碎,导致试件内部的裂缝增多,试件强度降低,同时成型压力过高

时, 压缩空气的反作用力更大, 反而对成型不利。因此本文选取 15 MPa 作为块体成型的强度。

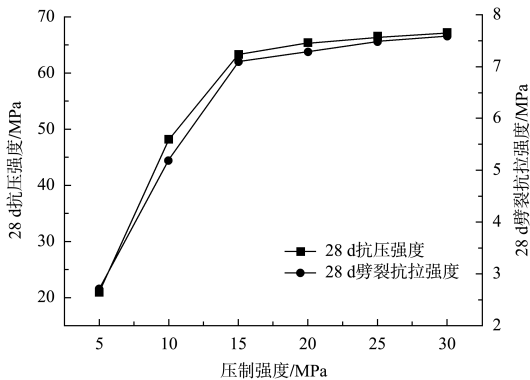


图 3 不同压制强度下试件的强度

Fig. 3 Strength of specimens under different compressive strengths

2.4.2 成型水分

含水率是影响块体强度的一个重要因素, 选取 15 MPa 压制强度, 研究在此压强下的最佳含水率。不同含水率下试件的强度变化见图 4, 可以看出, 含水率从 10% 增加到 13% 时, 试件的抗压强度和劈裂抗拉强度均增大, 含水率为 13% 时抗压强度和劈裂抗拉强度最大, 而当含水率继续增加, 试件的抗压强度和劈裂抗拉强度开始持续减小。这主要是因为试件中的胶凝材料需要水进行水化反应, 如果没有足够的水量, 胶凝材料水化反应不完全, 生成的水化产物不能很好地填充试件内部的孔隙, 导致骨料之间的黏结力变差, 会使试件的强度变差。而超过最佳含水率后, 在压制过程中, 过多的水会产生一层黏膜, 对物料的水化产生阻碍作用, 从而导致试件的强度降低。

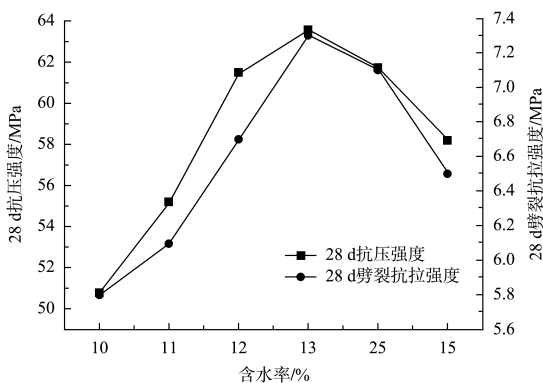


图 4 不同含水率下试件的强度

Fig. 4 Strength of specimens at different moisture contents

2.4.3 养护方式

对压制成型试件分别采用标准养护、自然养护、室内定期洒水养护 3 种方式进行养护, 并检测其力学性能。不同养护条件下块体抗压强度的变化见图 5。结果表明: 使用标准养护试件的 28 d 抗压强度和劈裂抗压强度最大, 与自然养护相比抗压强度提高 7.3 %, 与室内定期洒水养护相比抗压强度提高 3.2 %。试件的强度主要来源是物料的水化产物, 其需要外界为其提供水分来进行水化反应。自然养护的抗压强度差, 主要是因为不能为水化反应提供足够的水分。室内定期洒水养护试件的性能要高于自然养护试件性能。这说明温度和湿度对试件强度的影响很大, 选择合适的养护条件对试件的强度增长很重要。

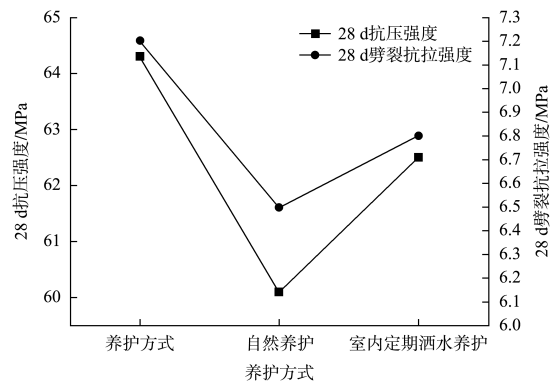


图 5 不同养护条件下试件的强度

Fig. 5 Compressive strength of specimens under different curing conditions

3 结论

1) 含泥量 13.3%~98% 时, 试件的强度随着含泥量的增加呈先增后减的趋势, 在土样含泥量为 52% 左右时强度达到最大。其 28 d 抗压强度和劈裂抗拉强度分别为 65.5 和 7.13 MPa; 较之含泥量 62% 的土样试件, 含泥量 52% 土样试件 28 d 抗压和劈裂抗拉强度分别提高 3.4% 和 7.4%; 含泥量分别为 5.3% 和 13.3% 的土样试件, 由于没有足够的细颗粒在压制时均匀填补物料间空隙, 无法在压制后即刻脱模成型。

2) 含泥量 62% 的疏浚土块体标准养护和定期洒水养护的软化系数分别达到 0.94 和 0.92, 具有良好的抗水侵蚀性能。压制成型过程中, 通过

挤出拌合物中包裹的空气,减少气孔的数量和体积,排出部分多余水分,消除浆体因化学收缩引起的部分微裂缝等多重作用,有效提高块体密实度和强度,从而提高疏浚土块体抗水侵蚀耐久性。

3) 在一定范围内提高压制强度对提高试件强度的效果明显,含水率为 13% 时试件强度最大,温度和湿度对试件强度有较大影响,标准养护较之定期洒水、自然养护试件强度高。以高含泥量疏浚土为主要原料,可以制备压载块、护面砖等人工块体,替代普通混凝土。研究成果可为淤泥、粉土、粉砂等不同类型疏浚土制备人工块体提供参考和借鉴。

参考文献:

- [1] 王铎鑫,江朝华,孙逸琳,等. 低碳地聚合物固化处理疏浚淤泥力学性能试验研究[J]. 水运工程, 2022(8): 40-44, 57.
WANG X X, JIANG C H, SUN Y L, et al. Experimental study on mechanical property of dredged silt treated by low carbon geopolymer[J]. Port & waterway engineering, 2022(8): 40-44, 57.
- [2] BARUZZO D, MINICHELLI D, BRUCKNER S, et al. Possible production of ceramic tiles from marine dredging spoils alone and mixed with other waste materials [J]. Journal of hazardous materials, 2006, 134(1/3): 202-210.
- [3] MEZENECVOVA A, YEBOAH N N, BURNS S E, et al. Utilization of Savannah Harbor river sediment as the primary raw material in production of fired brick [J]. Journal of environmental management, 2012, 113: 128-136.
- [4] 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(7): 93-97, 104.
YANG P Q, AN X R, PENG Y Z, et al. Study on performance of concrete pavement brick with dredged sediment non-sintered wrap shell aggregates [J]. New building materials, 2018 (7): 93-97, 104.
- [5] 冯明,江朝华,孙建伟,等. 基于低碳地聚物的长江下游疏浚砂固化块体力学性能和干缩特性试验研究[J]. 水运工程, 2023(1): 18-23.
FENG M, JIANG C H, SUN J W, et al. Experimental study on mechanical properties and drying shrinkage characteristics of dredged sand blocks in lower reaches of the Yangtze River based on low-carbon geopolymers [J]. Port & waterway engineering, 2023(1): 18-23.
- [6] 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 W H, LI Y, WEI Y X. The study of manufacturing accoropode with dredging mud from deep water channel [J]. Building technology, 2018, 2(1): 61-65.
- [7] BROUWERS H J H, AUGUSTIJN D C M, 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.
- [8] 崔勇涛,刘文白. 固化剂固化疏浚土的渗透性与微观机理研究[J]. 长江科学院院报, 2017, 34(5): 109-114.
CUI Y T, LIU W B. Permeability and micro-mechanism of dredged mud solidified with curing agent [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2017, 34(5): 109-114.
- [9] 封孝信,刘刚. 泥土对混凝土性能的影响综述[J]. 华北理工大学学报(自然科学版), 2017, 39(2): 46-65.
FENG X X, LIU G. A review of effect of clay on performance of concrete [J]. Journal of North China University of Science and Technology (natural science edition), 2017, 39(2): 46-65.
- [10] 刘红霞,韩晓虎. 砂石含泥量对混凝土工作性及抗压强度的影响[J]. 价值工程, 2015, 34(15): 107-109.
LIU H X, HAN X H. Effects of clay content of sand on workability and compressive strength of concrete [J]. Value engineering, 2015, 34(15): 107-109.
- [11] 岳文飞. 基于疏浚土资源化利用技术的入库航道清淤工艺[J]. 水运工程, 2023(S2): 81-85.
YUE W F. Desilting process for inbound channel based on resource utilization technology for dredged soil [J]. Port & waterway engineering, 2023(S2): 81-85.
- [12] 李波,付桂,高梁. 长江口航道疏浚土利用方式与发展方向[J]. 水运工程, 2022(11): 178-183.
LI B, FU G, GAO L. Utilization mode and development directions of dredged soil in the Yangtze River Estuary channels [J]. Port & waterway engineering, 2022 (11): 178-183.