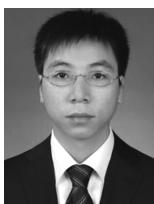


· 综合 ·



含水率对水泥-钢渣复合固化疏浚土性能的影响*

冯兴国¹, 朱超¹, 沈阳², 杜贵正², 汪彦³, 吴腾¹, 马芳平⁴

(1. 河海大学港口海岸与近海工程学院, 江苏南京 210098; 2. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江杭州 311122; 3. 浙江杭州京杭运河二通道建设投资有限公司, 浙江杭州 310003; 4. 国家能源集团大渡河流域水电开发有限公司, 四川成都 610041)

摘要:为解决钢渣固化疏浚土水化速率慢、早期强度低的问题,将水泥与钢渣复合,以提高固化土早期强度。通过应力-应变曲线、无侧限抗压强度和弹性模量研究了含水率对水泥-钢渣复合固化疏浚土性能的影响,并分析水泥-钢渣复合固化机理。研究发现:复合固化土强度随疏浚土含水率的降低而增加;1.25倍液限固化土性能更接近1.5倍液限固化土性质。以疏浚土强度100 kPa为标准,试验研究了满足该强度标准的不同含水率水泥-钢渣复合配合比,对水泥-钢渣复合固化剂的实际应用有重要借鉴意义。微观分析表明,水泥钢渣复合作用机理主要是水泥水化和钢渣火山灰反应产生的水化硅酸钙和斜方钙沸石,能填充孔隙、黏结土颗粒、增强土骨架的承载能力。

关键词:疏浚土;水泥钢渣;含水率;固化机理

中图分类号: TV 851; U 616

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)07-0001-06

Influence of moisture content on the performance of dredged soil solidified by cement-slag composites

FENG Xing-guo¹, ZHU Chao¹, SHEN Yang², DU Gui-zheng², WANG Yan³, WU Teng¹, MA Fang-ping⁴

(1. College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Power China Huadong Engineering Co., Ltd., Hangzhou 311122, China;

3. Zhejiang Hangzhou Jinghang Canal Second Channel Construction Investment Co., Ltd., Hangzhou 310003, China;

4. China Energy Group Dadu River Hydropower Development Co., Ltd., Chengdu 610041, China)

Abstract: To solve the problems of slow hydration rate and low early strength of dredged soil solidified by steel slag, cement and steel slag were combined to improve the early strength of solidified soil. The influence of water content on the properties of soil solidified by cement-steel slag composite was studied through stress-strain curve, unconfined compressive strength, and elastic modulus. It is found that the strength of composite solidified soil increases with the decrease of dredged soil moisture content, and the properties of 1.25 times of liquid limit-soil are closer to those of 1.5 times liquid limit-soil. Based on the dredged soil strength of 100 kPa, the mixed ratio of cement and steel slag with different moisture content satisfying the strength standard was studied experimentally, which has important reference significance for the practical application of cement and steel slag composite curing agent. The microscopic analysis suggested that the mechanism of cement-slag composite action is that the reaction of cement hydration and slag pozzolan produce hydrated calcium silicate and orthorhombic, which can fill the pores, bond the soil particles and enhance the bearing capacity of the soil skeleton.

Keywords: dredged soil; cement and slag; moisture content; curing mechanism

收稿日期: 2020-10-31

*基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金项目(B200203074); 江苏省研究生科研与实践创新计划项目(KYCX20_0547); 浙江省交通运输厅科技计划项目(2020015)

作者简介: 冯兴国(1983—), 男, 博士, 教授, 研究方向为港口、海岸及近海工程。

江苏省航道整治、河湖治理工程每年产生大量疏浚土，尤其是长江下游航道淤积严重，疏浚工程量大，仅 2015 年南京以下河段疏浚量达 1 200 万 m³^[1]。将疏浚土抛填至指定区域，既会造成环境二次污染，还占用大量土地资源。近年来，疏浚土固化技术快速发展，通过加入固化材料，将高含水率、缺乏强度的疏浚土改良为低含水率、具有一定强度的工程用土^[2]。传统的固化材料主要以水泥为主^[3]，但水泥成本高昂，生产水泥的过程中易产生能源消耗、CO₂排放等环境问题。因此，研制更环保、低廉的疏浚土固化材料是其资源化利用的关键。

国内外学者针对典型工业废弃物(如粉煤灰、钢渣等)对疏浚土的固化性能和作用机理进行了大量研究。Ding^[4]通过控制粉煤灰、水泥和疏浚淤泥的比例，发现粉煤灰在一定水泥掺量条件下能充分发挥火山灰反应，明显提高疏浚土强度。王东星^[5]采用活性 MgO 激发粉煤灰作为固化材料，发现镁碳酸盐是碳化-固化联合技术提高疏浚土强度的关键因素。Myounghak^[6]认为疏浚土的含水率越低，钢渣掺量越多，固化土的强度越高。Toda^[7]发现钢渣在疏浚土中生成的水化硅酸钙(C-S-H)是提高疏浚土固化强度的首要因素。由于钢渣内部活性物质难以被激发，水化速率缓慢，因而单独使用钢渣固化疏浚土早期强度较低。

综上所述，粉煤灰和钢渣均可用作固化剂来提高疏浚土强度，且含水率是影响固化土性能的重要参数。近年来粉煤灰价格上涨，导致粉煤灰固化疏浚土的成本提高；同时，钢渣水化速率慢、固化土早期强度较低，制约了钢渣固化疏浚土的推广应用。本文使用钢渣和水泥复合材料处理疏浚土，通过水泥水化使疏浚土快速成型并具有一定的初期强度，利用水化反应产物激发钢渣，弥补单独使用钢渣的不足，提高疏浚土的后期强度。研究成果为高效快速固化疏浚土提供新的技术途径、为疏浚土资源化提供借鉴和参考。

1 试验材料及方案

1.1 试验材料

本研究疏浚土土样取自长江西陵河段江心洲疏浚后堆填陆域，钢渣由南京钢铁嘉年华新型建材有限公司提供。将疏浚土和钢渣室外自然风干 2 d 后，再经烘箱 80 ℃烘烤 2 h，最后由粉碎机粉碎并通过 0.63 mm 标准土工筛。疏浚土基本性能为：液限 42%，塑限 14%，塑性指数 28，pH 值为 6.72。X 射线荧光光谱分析(XRF)的疏浚土土样和钢渣化学成分见表 1。

表 1 疏浚土和钢渣主要氧化物组成

氧化物	组成/%	
	疏浚土	钢渣
SiO ₂	58.56	14.87
CaO	5.56	46.01
Fe ₂ O ₃	7.47	25.04
Al ₂ O ₃	19.47	2.1
其他	8.94	11.98

1.2 试验方案

通过测量固化土的应力-应变曲线，分析经水泥-钢渣复合处理后土体的力学性能；通过 X 射线衍射试验(XRD)分析固化机理。将疏浚干土、水泥和钢渣按照表 2 配比称量并倒入搅拌锅中，采用自动档位搅拌 2 min 后，铲掉搅拌机叶片上黏结的物料，继续搅拌，待材料充分混合均匀后分两次将水加入搅拌锅中，每次加水后搅拌 2 min。将混合均匀的土体装入 φ50 mm×100 mm 的 PVC 管内，用塑料薄膜包裹密封后，置入密封塑料箱室温养护。

试样在 PVC 管内固化 7、14、28 d 后，利用万能试验机以 1 mm/min 压缩速度加压，进行无侧限抗压强度测试。取破坏试样内部土体，放入乙醇中浸泡 24 h 后将其低温(40 ℃)干燥以终止水化反应；研磨过 200 目筛子，进行 X 射线衍射试验。

表 2 水泥钢渣复合固化疏浚土配合比

液限倍数	含水率/%	水泥钢渣与干土质量比/%
1.50	63	10,20,30
1.25	53	10,20,30
1.00	42	10,20,30

注：水泥、钢渣质量比(wt. %)统一为 3:7。

2 试验结果及分析

2.1 固化疏浚土应力-应变曲线

初始含水率为 1.50 倍液限、1.25 倍液限和 1.00 倍液限的疏浚土采用 10% 水泥-钢渣复合材料固化 28 d 后的应力-应变曲线见图 1。可以看出, 1.50 倍液限含水率固化土的应力-应变曲线上无明显的应力峰, 而 1.25 倍液限和 1.00 倍液限的疏浚土固化试样有明显的应力峰, 表明 1.50 倍液限疏浚土固化后形成的有效提升土体强度的水化产物数量有限, 难以改变固化土的可塑状态。曲线中峰值点对应的应变为土体受压破坏时的极限应变。可以看出在水泥-钢渣固化 28 d 后, 1.25 倍液限和 1.00 倍液限疏浚土的极限应变大致相当, 极限应变均在 5% 左右, 这可能与两种土体均添加 10% 含量的水泥钢渣复合材料有关。此外, 图 1 中, 1.25 倍液限固化土的应力-应变曲线更接近 1.50 倍液限土的应力-应变曲线, 且远低于 1.00 倍液限固化土的应力-应变曲线, 这是因为初始时前两种含水率的土壤均处于流动状态, 而后者土体在添加了复合材料后处于可塑状态, 因而破坏时所需的应力更大。

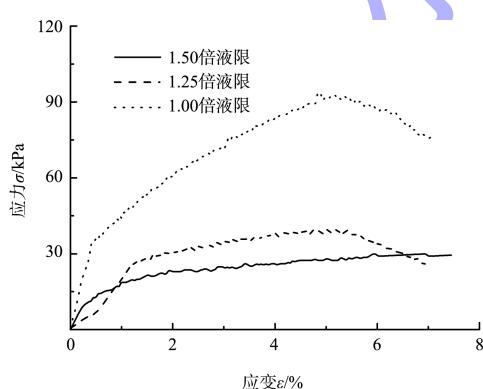


图 1 3 种含水率疏浚土固化后的应力-应变曲线

2.2 固化疏浚土无侧限抗压强度

试验中将 3 个平行试样强度的平均值作为该组试样无侧限抗压强度值, 并根据各强度值和平均值计算标准偏差。添加误差棒后的无侧限抗压强度见图 2。

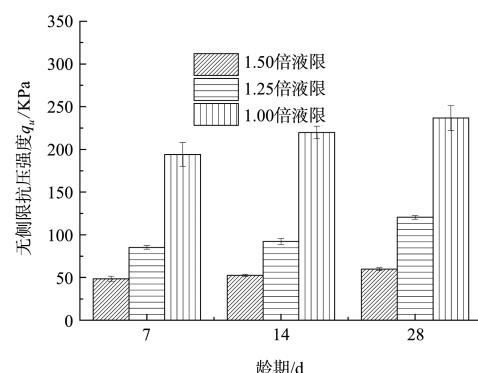


图 2 掺入 20% 水泥钢渣疏浚土不同龄期时 3 组含水率无侧限抗压强度

疏浚土经 20% 水泥钢渣固化不同龄期的无侧限抗压强度: 1.00 倍液限固化土无侧限抗压强度最高, 其次是 1.25 倍液限固化土, 1.50 倍液限固化土无侧限抗压强度最低, 并且当含水率由 1.50 倍液限降为 1.25 倍液限时, 无侧限抗压强度增加量远小于含水率从 1.25 倍液限降至 1.00 倍液限时无侧限抗压强度的增加量。因此可初步认为, 在相同固化龄期内, 随着初始含水率的降低, 固化土无侧限抗压强度逐步增加, 且 1.25 倍液限土强度与 1.50 倍液限土强度更接近, 这是因为含水率降低, 相同时间内固化反应产生的胶凝相水化产物增加, 宏观表现为固化土无侧限抗压强度的提高, 这与应力-应变曲线得到的结果一致。

2.3 固化疏浚土的弹性模量

固化土的刚度特性也是衡量水泥钢渣复合材料固化疏浚土效果的重要参数, 通常以割线弹性模量 E_{50} 来体现, 即无侧限抗压强度试验得到的应力-应变曲线上 $q_u/2$ 处对应的切线模量^[8]。疏浚土在 3 种含水率下固化 28 d 时的弹性模量见图 3。

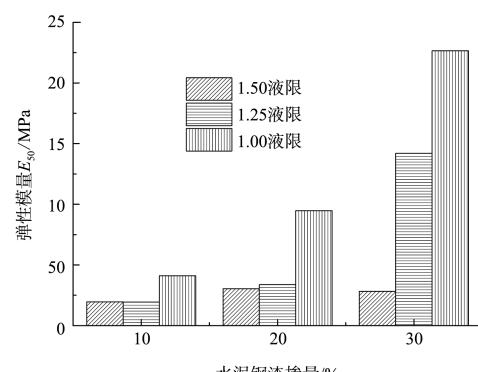


图 3 不同掺量下 3 种含水率固化土弹性模量

由图 3 可知：1.00 倍液限土弹性模量值远高于 1.50 倍液限土模量值，尤其当水泥钢渣配比设定为 30% 时，前者模量值约为后者模量值的 10 倍，约 22.5 MPa，超过硬黏土的标准(7~18 MPa)。此外，1.50 倍液限固化土的弹性模量随水泥钢渣量的增加整体上并没有明显变化，可能是因为初始含水率过高导致固化土在整个养护周期内始终都是塑性破坏，弹性模量并不能明显增加；1.25 倍液限土在掺入较少固化剂时的弹性模量与 1.50 倍液限土的结果接近，而在掺入 30% 水泥钢渣后的弹性模量迅速增长，这是由于高含量的固化剂能结合更多的自由水，产生的胶凝物能够有效承担

荷载，从而使土体由塑性破坏转变为脆性破坏，导致弹性模量增大。而 1.00 倍液限土含水率较低，添加较少的固化剂即可发生脆性破坏，所以弹性模量较大。因此可以认为，在相同配合比条件下，随着含水率的降低，弹性模量总体上保持逐步增长的趋势，这与罗鸿^[9]对黏土材料强度特性研究得出的结论一致。

2.4 现场试样分析

为更直观地说明含水率对水泥钢渣复合处理疏浚土效果的影响，选取添加最多掺合料的试验组(30% 水泥钢渣)进行分析，试样的形貌见图 4。



图 4 不同含水率试样压碎破坏情况

3 种含水率的疏浚土掺混高含量(30%)水泥钢渣并经 14 d 固化脱模后，1.50 倍液限试样土体表面有极少量水分，呈湿润状态，且受压破坏后裂缝以 V 形发展；1.25 倍液限土体表面无明显水分，但仍呈湿润状态，试样受压破坏后也伴随有 V 形裂缝；而 1.00 倍液限土表面无明显水分，呈干燥状态，受压破坏产生的裂缝多分布在荷载施加位置。

由此可见，含水率是影响水泥钢渣复合固化疏浚土效果的重要因素，且固化效果随初始含水率的降低而增强，Myounghak 和畅帅^[10]关于软土固化的研究也得到了类似的结论。这是由于高含量的自由水不仅能降低疏浚土内部环境中反应离子的浓度，使固化反应减弱，同时会增加土体流

动性，使水化产物对土体的黏结性能降低，导致已搭建的土骨架结构难以有效承受外部荷载，固化土强度因此降低。

2.5 工程参考标准

部分学者对固化土的无侧限抗压强度标准进行了研究。Shinsha^[11]认为只有将软土变成无侧限抗压强度 100~500 kPa 的刚性土，才能更高效地利用疏浚土。Kitazume 调研了日本中部国际机场人工岛的建设情况，通过室内试验建立加州承载比 CBR(某一贯入量下土基单位压力相对标准压力的百分数)和无侧限抗压强度的对应关系，发现日本交通部规范^[12]要求的固化土 CBR 值 2 对应的无侧限抗压强度为 80.1 kPa。Wu^[13]研究了国内首个采用固化废弃疏浚土的工程——大连湾跨海交通

人工岛工程, 确定土样的无侧限抗压强度值应不小于设计值 100 kPa。因此, 本试验将无侧限抗压强度的设计值定为 100 kPa。

水泥钢渣质量比为 3:7, 当龄期分别为 7 d 和 28 d 时, 所有试样的无侧限抗压强度见图 5。

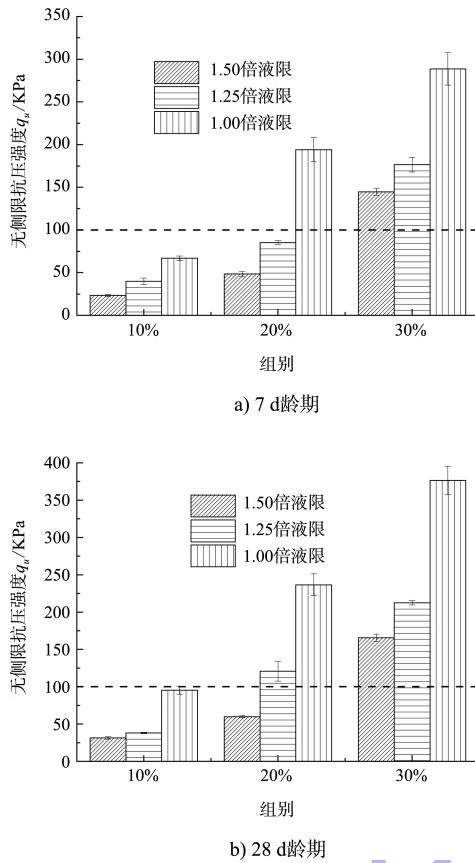


图 5 不同含水率各组试样无侧限抗压强度

当固化龄期为 7 d 时, 1.50 倍液限土和 1.25 倍液限土均须掺混 9% 水泥、21% 钢渣才能达到 100 kPa 的刚性土下限要求, 而 1.00 倍液限土掺混 6% 水泥、14% 钢渣的强度即可达到设计要求; 当固化时间为 28 d 时, 1.50 倍液限土须掺混 9% 水泥、21% 钢渣才能满足强度要求, 而 1.25 倍液限土和 1.00 倍液限土掺混 6% 水泥、14% 钢渣的强度均超过 100 kPa。

2.6 作用机理分析

由于含水率并不影响水化产物的种类, 选取基准组 1.50 倍液限 20% 水泥钢渣固化 28 d 试样进行 XRD 测试, 试验结束后利用 jade 6 软件分析数据。使用子文件和化学元素过滤器两种方式综合寻峰, 以明确该峰所对应的矿物相或水化产物。

XRD 测试结果见图 6。

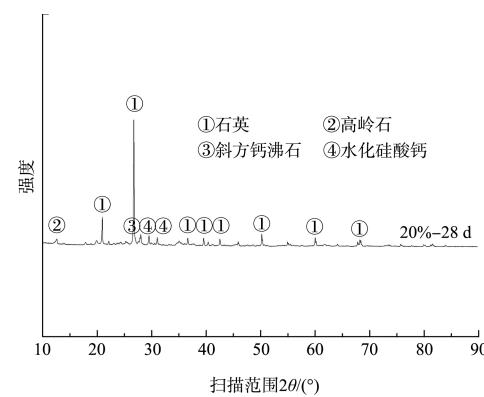
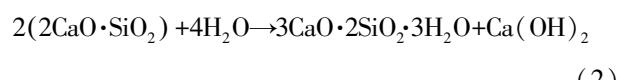
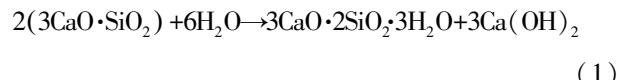


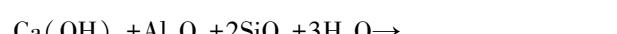
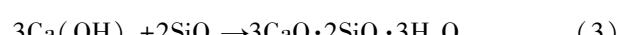
图 6 XRD 测试结果

根据 XRD 结果: 水泥钢渣复合处理疏浚土体系中主要分布 4 种矿物, 分别是石英、高岭石、斜方钙沸石 ($\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) 和水化硅酸钙 (C-S-H)。在基准组中, 当水泥与高含水率的疏浚土拌合后, 水泥矿物首先与水发生水化反应, 生成大量的 C-S-H 和氢氧化钙, 形成了高碱性环境。随着 OH^- 不断进入钢渣内部, 钢渣玻璃体结构逐渐被破坏, 释放出 Ca^{2+} 和 Si-O 、 Al-O , 钢渣活性得以提高^[14-15], 即活性 SiO_2 、 Al_2O_3 与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 反应生成 C-S-H 和斜方钙沸石。图 6 中不存在钢渣的标准矿物成分 (C_2S 、 C_3S), 也证实了钢渣已充分参与反应。化学反应方程如下^[16-17]:

水泥水化产生 C-S-H 和氢氧化钙:



火山灰反应产生 C-S-H 和斜方钙沸石:



固化疏浚土早期力学性能的提升主要是因为水泥水化产生了 C-S-H 和氢氧化钙, 而氢氧化钙提供的高碱性环境进一步激发钢渣的活性, 使其发生火山灰反应, 产生 C-S-H 和斜方钙沸石。C-S-H 和斜方钙沸石不仅能够填充土颗粒之间的孔隙, 使颗粒之间更密实, 还能够作为胶凝物起到

黏结土颗粒的作用，提高固化疏浚土的后期强度。

3 结论

1) 疏浚土经水泥钢渣复合处理后的性能随含水率的降低显著增强：固化土无侧限抗压强度和弹性模量逐步增加，破坏形式逐步从塑性破坏转变为脆性破坏，裂缝发展逐渐从整体裂缝(V形裂缝)变化为局部裂缝。同时相较于 1.00 倍液限土，1.25 倍液限固化土与 1.50 倍液限固化土在应力-应变曲线、强度演变、弹性模量以及裂缝发展等方面的性质更接近。

2) 明确了不同工期要求的各含水率疏浚土，采用水泥钢渣复合固化的配合比：当固化龄期为 7 d 时，1.50 倍液限土和 1.25 倍液限土均只有掺混 9% 水泥、21% 钢渣才能达到 100 kPa 的刚性土下限要求，而 1.00 倍液限土掺混 6% 水泥、14% 钢渣的强度即可达到设计要求；当固化时间为 28 d 时，1.50 倍液限土仍只有掺混 9% 水泥、21% 钢渣才能满足强度要求，而 1.25 倍液限土和 1.00 倍液限土掺混 6% 水泥、14% 钢渣的强度均超过 100 kPa。

3) 水泥钢渣复合能显著提升钢渣水化反应速率、提高固化疏浚土早期强度，因为反应产生的水化硅酸钙和斜方钙沸石，能填充孔隙、黏结土颗粒，提高土体的稳定性和承载力。

参考文献：

- [1] 陈海培, 翟华, 阎成浩. 长江南京以下深水航道维护疏浚现状及对策研究[J]. 中国水运 航道科技, 2018(2): 32-36.
- [2] TANG Y X, MIYAZAKI Y, TSUCHIDA T. Advanced reuses of dredging by cement treatment in practical engineering[C] // International Symposium on Coastal Geotechnical Engineering in Practice (IS-Yokohama 2000). Rotterdam: A A Balkema Publishers, 2000: 725-731.
- [3] HORPIBULSUKA S, RACHANB R, CHINKULKIJNIWAT A, et al. Analysis of strength development in cement stabilized silty clay from microstructural considerations[J]. Construction and building materials, 2010, 24(10): 2011-2021.
- [4] DING J H, FENG Z M, SUN D, et al. Analysis of influencing factors of silt solidified soil in flowing state[J]. World

journal of engineering and technology, 2019, 7(3): 455-464.

- [5] 王东星, 肖杰, 肖衡林, 等. 武汉东湖淤泥碳化-固化试验研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(5): 1805-1812.
- [6] MYOUNGHAK O, YOON G L, YOON Y W. Evaluation on the compressive strength of dredged soil-steel slag [J]. Japanese geotechnical society, special publication, 2016, 2(6): 298-301.
- [7] TODA K, SATO H, WEERAKOON N, et al. Key factors affecting strength development of steel slag-dredged soil mixtures [J]. Minerals, 2018, 8(5): 174.
- [8] KITAZUME M, SATOH T. Development of a pneumatic flow mixing method and its application to Central Japan International Airport construction[C] // Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement. London: ICE Publishing, 2003: 139-148.
- [9] 罗鸿, 黄诗渊, 温辉波, 等. 粘土材料单轴压缩及强度特性试验研究[J]. 水电能源科学, 2019, 37(5): 98-102.
- [10] 畅帅. 杭州软土固化优化研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- [11] SHINSHA H, KUMAGAI T. Material properties of solidified soil grains produced from dredged marine clay [J]. Soils and foundations, 2018, 58(3): 678-688.
- [12] 運輸省. 空気流動混合法[S]. 東京: アンキ出版, 1999.
- [13] WU S L, ZHU W, LV Y Y, et al. Quality control indexes and curing agent values for submerged poured solidifying-silt island; case study of the artificial island of Dalian Bay, China [J]. Construction and building materials, 2018, 190: 664-671.
- [14] 刘倩雯. 钢渣的成分增补和激发与再生利用效能提升[D]. 南京: 东南大学, 2016.
- [15] 邢天鹏, 俞雅俊, 孙振国等. 钢渣粉的生产与应用[J]. 新型建筑材料, 2015, 42(6): 15-17.
- [16] HE J, SHI X K, LI Z X, et al. Strength properties of dredged soil at high water content treated with soda residue, carbide slag, and ground granulated blast furnace slag [J]. Construction and building materials, 2020, 242: 118126.
- [17] ZENG L L, BIAN X, ZHAO L, et al. Effect of phosphogypsum on physicochemical and mechanical behaviour of cement stabilized dredged soil from Fuzhou, China [J]. Geomechanics for energy and the environment, 2020: 100195.

(本文编辑 武亚庆)