

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.07.010

基于响应面法的给水厂污泥固化配比优化

赵吉¹, 颜鹏², 秦庆东², 杨晶晶^{3,4}

(1. 华衍环境投资<江苏>有限公司, 江苏 常州 213000; 2. 东南大学 土木工程学院, 江苏 南京 211189; 3. 苏州科技大学 环境科学与工程学院, 江苏 苏州 215009; 4. 苏州市 海绵城市技术重点实验室, 江苏 苏州 215009)

摘要: 为实现给水厂污泥资源化利用,选取生石灰、硅酸盐水泥和高吸水树脂对给水厂污泥进行固化处理。基于单因素试验对给水厂污泥固化参数进行初步筛选,采用响应面法设计复合固化剂的试验方案,以7 d无侧限抗压强度为响应值,确定固化剂最优配比。结果表明:影响无侧限抗压强度的固化剂排序为生石灰>硅酸盐水泥>高吸水树脂;生石灰和硅酸盐水泥的交互作用显著;生石灰、硅酸盐水泥和高吸水树脂的最佳掺量分别为47.43%、13.11%和0.45%,在此条件下,固化污泥的7 d无侧限抗压强度为0.51 MPa。响应面模型对无侧限抗压强度的预测值与实测值接近,说明模型可信度较高,这可以为实际工程应用提供设计参考。

关键词: 给水厂污泥; 响应面法; 固化剂; 配比优化; 无侧限抗压强度

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)07-0063-06

Optimization of Sludge Solidification Ratio in Water Supply Plant Based on Response Surface Method

ZHAO Ji¹, YAN Peng², QIN Qing-dong², YANG Jing-jing^{3,4}

(1. Huayan Environmental Investment <Jiangsu> Co. Ltd., Changzhou 213000, China; 2. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China; 3. School of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China; 4. Key Laboratory of Suzhou Sponge City Technology, Suzhou 215009, China)

Abstract: Lime, silicate cement and super absorbent resin were selected to solidify and recycle the sludge from a water supply plant. The solidifying parameters of the sludge from the water supply plant were initially selected based on single factor experiment. The experimental plan for composite curing agent was designed by response surface method, and the optimal composition of curing agent was determined by taking 7-day unconfined compressive strength as the response value. The curing agents influencing the unconfined compressive strength in descending order were as follows: lime, silicate cement and super absorbent resin. The interaction between lime and silicate cement was significant. The optimal proportions of lime, silicate cement and super absorbent resin were 47.43%, 13.11% and 0.45%, and the 7-day unconfined compressive strength of solidified sludge was 0.51 MPa. The predicted values of the unconfined compressive strength obtained by the response surface model were close to the measured

基金项目: 苏州市科技计划项目(SS202107)

通信作者: 杨晶晶 E-mail: yjjnancy@163.com

values, indicating that the model was highly reliable. The experimental results can provide reference for practical engineering application.

Key words: sludge from water supply plant; response surface method; curing agent; optimization of the composition; unconfined compressive strength

给水厂在制水过程中会产生大量污泥。据报道,我国每年产生约 $1.5 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的给水厂污泥^[1]。目前,给水厂污泥的常规处置方式主要包括排入污水管道或自然水体、海洋投弃和卫生填埋等^[1-2],但这些处理方式均会对自然环境产生一定程度的危害。近年来关于给水厂污泥资源化利用的研究不断引起人们的重视,国内对给水厂污泥资源化利用的手段主要有土地利用,作为建材原料^[3]以及回收铝盐^[4]、铁盐^[5]等,但是大部分资源化利用技术仍不成熟,都存在一定的缺陷而影响其推广应用。

给水厂干污泥除了含有少量有机质与较高水分之外,其成分与黏土接近。黏土的路用性能较差,实际工程中常常使用固化剂对其进行改良,改良后的黏土不仅工程性能得到显著提高,还能解决路基填料不足的问题。石灰和水泥是工程中常见的固化剂,价格低廉、运输方便、对土壤和淤泥的稳定效果好。贾尚华等^[6]将内蒙古河套粉质黏土与石灰水泥拌和,分析了石灰水泥土的无侧限抗压强度,发现石灰水泥土存在多种复合作用;邓东升等^[7]采用生石灰处理高含水率的疏浚淤泥,提出了生石灰处理土的无侧限抗压强度与原泥初始含水量及处理土含水量间的定量关系;肖庆一等^[8]在红黏土中加入石灰,改良后红黏土的耐久性和力学性能均得到提高,能够满足公路对路基填料的强度要求。为了进一步提高固化效果,高吸水树脂也受到了人们的关注。高吸水树脂属于新型功能高分子材料,无毒,含有羟基和羧基等亲水基团,一般可吸收自重几百倍或几千倍的水分,并且吸水速度快,蓄水性强,在加压加热等条件下也不易失水。程福周等^[9]采用生石灰、水泥、粉煤灰和高吸水树脂处理高含水率疏浚淤泥,通过正交试验确定固化材料的最佳配比,并对固化机理进行了探讨。因此,将给水厂污泥进行固化,不仅可以节约大量污泥处置费,减少环境污染,而且还能达到资源化利用的目的。

响应面法是利用合理的设计并通过试验得到一定数据,建立响应值和影响因子之间的数学模

型,通过回归方程对各影响因子的交互作用进行分析,寻求最优工艺配比,从而解决多变量问题的一种优化方法,已广泛应用于众多行业。笔者选取生石灰、水泥和高吸水树脂作为固化剂,在单因素试验基础上,利用响应面法设计复合固化剂的试验方案,以固化污泥的7 d无侧限抗压强度为响应值,固化剂掺量为影响因子,通过Design-Expert软件得到无侧限抗压强度的二次多元回归模型,确定固化剂最佳配比,以期满足二级及二级以下公路底基层的施工要求。最后对比预测值与实测值以验证模型的准确性,旨在为工程设计和施工提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

给水厂污泥取自江苏省苏州市某自来水厂,其主要成分为 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 等无机物,小于0.075 mm的颗粒含量大于50%,与黏土类似。污泥主要物化参数的测定参考《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019),其含水率为252.31%,有机质占比为13.62%,硫酸根占比为0.76%,液限为381.4%,塑性指数为145.7。分析可知,给水厂污泥液限>50%,塑性指数>26,为高液限黏土;其硫酸根含量<0.8%,塑性指数>15,污泥含水率过高,根据《公路路面基层施工技术细则》(JTG/T F20—2015)规定,该类黏性土可采用石灰和水泥综合稳定。试验所用生石灰的氧化钙和氧化镁含量为87%,符合钙镁I级标准;水泥为海螺牌32.5级普通硅酸盐水泥;高吸水树脂的粒径为80目,吸水率为500倍。

1.2 试样的制作与养护

首先将给水厂污泥碾碎并过2 mm筛去除杂质,之后将一定配比的固化剂与给水厂污泥均匀拌和,闷料6 h后分3层装入圆柱模具内。模具外径约为70 mm、内径为50 mm、高为120 mm,每个模具配有两块实心压柱,压柱尺寸为 $\varnothing 50 \text{ mm} \times 35 \text{ mm}$,试验前在模具内部涂抹一层凡士林以便脱模。通过静压法将固化污泥压制成直径为50 mm、高为50 mm的试件,在自然条件下养护24 h后用脱模器将试件取

出,脱模后用塑料薄膜包裹试件并放入温度为20℃、湿度≥95%的恒温恒湿标准养护箱至规定龄期(取7、14和28 d)。每组制作5个平行试件,养护至规定龄期的前一天将试件浸水24 h,浸水后取出并将其表面擦干,采用石灰土无侧限压力仪测量各试件的无侧限抗压强度,取5个试件的平均值作为该配比和养护龄期下的无侧限抗压强度值。

1.3 试验设计

首先进行单因素试验,即采用单一固化剂处理给水厂污泥,以7 d无侧限抗压强度为评价标准,设定养护龄期为7、14和28 d,分析单一固化剂对污泥的固化效果,初步确定固化剂的掺量范围。在单因素试验的基础上,以三因素(X_1 、 X_2 、 X_3)、三水平(-1, 0, 1)的Box-Behnken法设计试验,生石灰掺量的编码值为 X_1 ,水泥掺量的编码值为 X_2 ,高吸水树脂掺量的编码值为 X_3 。Box-Behnken法的试验次数为 $2K(K-1)+C_0$,其中 K 表示影响因子数, C_0 代表中心点个数。本研究中 K 取3, C_0 取5,计算得出试验总次数为17次,所考察的因素和水平见表1。

表1 试验因素和水平

Tab.1 Experimental factors and levels

因素	编码值	编码水平/%		
		低(-1)	中(0)	高(+1)
生石灰	X_1	40	45	50
硅酸盐水泥	X_2	5	10	15
高吸水树脂	X_3	0.3	0.4	0.5

2 结果与讨论

2.1 单因素试验

2.1.1 生石灰单掺试验

图1为生石灰掺量对无侧限抗压强度的影响。可知,生石灰固化污泥的无侧限抗压强度随养护龄期的延长而稍微增大。当生石灰的掺量在10%~45%时,固化污泥的无侧限抗压强度随生石灰掺量的增加而增大,这是由于生石灰与污泥拌和后会发生一系列的物化反应,主要包括离子交换反应、消化膨胀作用和火山灰反应。生石灰在水中电离出的钙离子会和污泥中的钠离子、钾离子等发生离子交换,改变污泥表面的带电状态,使得污泥颗粒黏聚成团,保证了固化污泥的初期稳定性。同时,生石灰消化会释放大热量,在降低固化污泥含水率的同时也对污泥产生膨胀挤密作用。另外,污泥中的氧化硅、氧化铝与氢氧化钙反应,生成的硅酸钙水

合物和铝酸钙水合物会作为保护膜覆盖在污泥颗粒表面并填充颗粒间隙,提高固化污泥的强度和水稳性。当生石灰掺量为45%时,固化污泥无侧限抗压强度最大。而当掺量在45%~50%时,固化污泥的强度随生石灰掺量的增大呈下降趋势,这是由于当生石灰掺量过高时,会有一部分生石灰不参与反应而沉积在污泥孔隙中,但此时固化污泥的强度仍较大。因此,生石灰掺量区间取40%~50%。

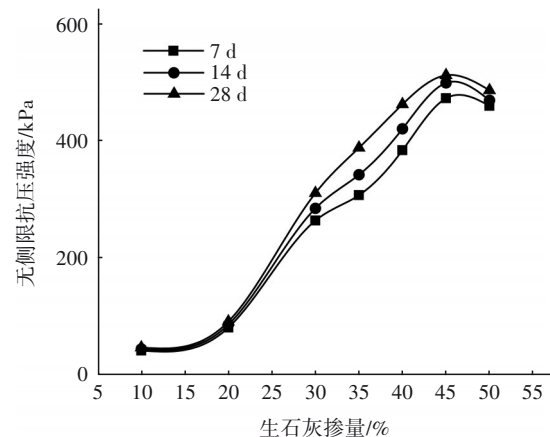


图1 生石灰掺量对无侧限抗压强度的影响

Fig.1 Influence of lime content on unconfined compressive strength

2.1.2 水泥单掺试验

图2为水泥掺量对无侧限抗压强度的影响。

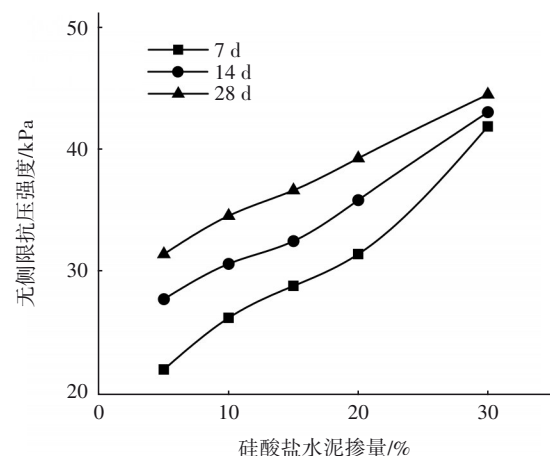


图2 水泥掺量对无侧限抗压强度的影响

Fig.2 Influence of cement content on unconfined compressive strength

由图2可知,当水泥掺量为5%~30%时,固化污泥的无侧限抗压强度随水泥掺量的增加而增大,主要是由于水泥的水解和水化反应、硬凝反应和离子交换作用^[10]。水解和水化反应使得污泥中的水

和水泥颗粒表面矿物反应生成氢氧化钙、水化硅酸钙和水化铝酸钙等具有一定黏结力的化合物。当水泥水化反应进行到一定程度时,溶液中会析出钙离子,这部分钙离子与污泥中的二氧化硅和氧化铝反应生成不溶于水的结晶化合物,这些化合物在水和空气中不断硬化,增大了固化污泥的强度。另外,固化污泥的无侧限抗压强度随养护龄期的延长而增大,这是因为固化污泥的养护时间越长,水泥发生物理化学作用的时间越充分,产物与污泥结合更紧密,密实度增大,固化污泥的强度也得到提高。当水泥掺量为 30% 时,固化污泥的 7、14、28 d 无侧限抗压强度均在 42 kPa 左右。考虑到实际工程应用成本,水泥掺量区间取 5% ~ 15%。

2.1.3 高吸水树脂单掺试验

图 3 为高吸水树脂掺量对无侧限抗压强度的影响。可知,高吸水树脂固化污泥的无侧限抗压强度随养护龄期的延长而增大。当高吸水树脂的掺量在 0.1% ~ 0.4% 时,固化污泥的强度随高吸水树脂掺量的增加而增大,这是因为高吸水树脂可以通过水合作用吸收污泥水分并储存起来,当吸水至饱和后会呈凝胶状,使污泥颗粒凝聚并填充其孔隙,从而导致固化污泥的无侧限抗压强度提高。当高吸水树脂掺量为 0.4% 时,固化污泥的无侧限抗压强度最大。而当掺量在 0.4% ~ 0.8% 时,固化污泥的强度随高吸水树脂掺量的增大而降低,这是由于过量的高吸水树脂会吸水膨胀,在固化污泥内部形成孔洞,致使其密实性降低。因此,高吸水树脂掺量区间取 0.3% ~ 0.5%。

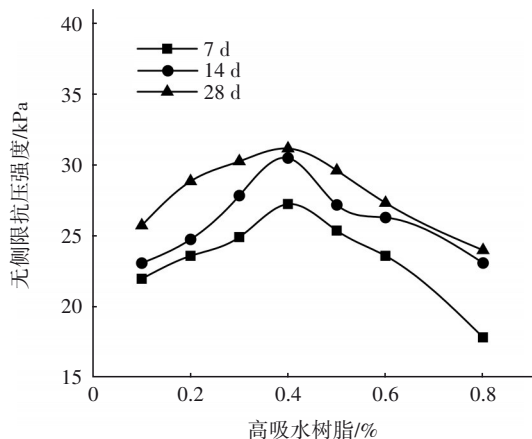


图 3 高吸水树脂掺量对无侧限抗压强度的影响

Fig.3 Influence of super absorbent resin content on unconfined compressive strength

2.2 响应面法优化配比

2.2.1 试验结果

由单因素试验确定生石灰、水泥、高吸水树脂的掺量范围分别为 40% ~ 50%、5% ~ 15%、0.3% ~ 0.5%。以 7 d 无侧限抗压强度为响应值,试验设计及结果见表 2。

表 2 试验设计及结果

Tab.2 Experimental design and results

项 目	X_1	X_2	X_3	7 d 无侧限抗压强度/kPa
1	-1	1	0	409.2
2	0	1	-1	447.4
3	1	1	0	518.1
4	0	1	1	503.5
5	1	-1	0	425.6
6	-1	0	1	432.5
7	0	0	0	490.7
8	1	0	-1	451.2
9	0	0	0	492.5
10	0	0	0	488.4
11	0	0	0	489.7
12	1	0	1	497.0
13	0	-1	1	443.9
14	-1	0	-1	391.2
15	0	-1	-1	383.6
16	1	-1	0	394.4
17	0	0	0	491.6

2.2.2 回归模型与方差分析

通过 Design-Expert 软件对试验结果进行二次多项式回归拟合,得到二次多元回归方程及其各项系数的方差分析,其结果见表 3。

表 3 7 d 无侧限抗压强度二次多元回归模型的方差分析

Tab.3 Variance analysis of the quadratic multiple regression model of 7-day unconfined compressive strength

项 目	系 数	F 值	P 值
X_1	33.08	339.59	<0.000 1
X_2	28.84	258.15	<0.000 1
X_3	25.44	200.86	<0.000 1
X_1X_2	19.42	58.57	0.000 1
X_1X_3	1.12	0.20	0.671 0
X_2X_3	-1.05	0.17	0.691 5
X_1^2	-27.69	125.27	<0.000 1
X_2^2	-26.07	111.00	<0.000 1
X_3^2	-19.91	64.80	<0.000 1
模型	490.58	132.57	<0.000 1

由表3可知, X_1 、 X_2 和 X_3 的 P 值 <0.0001 ,说明3种固化剂对固化污泥无侧限抗压强度的影响极显著。 X_1X_3 和 X_2X_3 的 P 值 >0.5 ,说明生石灰和高吸水树脂、硅酸盐水泥和高吸水树脂之间的交互影响不显著。 X_1X_2 的 P 值为 0.0001 ,说明生石灰和硅酸盐水泥之间的交互影响显著。 X_1 、 X_2 和 X_3 项的系数均为正值,说明生石灰、硅酸盐水泥和高吸水树脂对固化污泥的无侧限抗压强度具有线性增长效应。 X_1X_2 项的系数为正值,说明生石灰和硅酸盐水泥之间具有协同效应。另外, X_1 、 X_2 和 X_3 的 F 值由大到小的顺序依次为生石灰、硅酸盐水泥和高吸水树脂,表明各固化剂对无侧限抗压强度的影响大小:生石灰 $>$ 硅酸盐水泥 $>$ 高吸水树脂。由表3可得出7d无侧限抗压强度响应值(Y_7)的二次多元回归方程,如下所示:

$$Y_7 = 490.58 + 33.08X_1 + 28.84X_2 + 25.44X_3 + 19.42X_1X_2 - 27.69X_1^2 - 26.07X_2^2 - 19.91X_3^2 \quad (1)$$

二次多元回归方程的 P 值 <0.0001 ,回归系数 R^2 为 0.9942 ,说明模型可以较好地对实际情况进行拟合。

2.2.3 响应面交互作用

由表3可以看出,多元回归方程二次交互项 X_1X_2 的 P 值为 0.0001 ,说明生石灰与水泥之间的交互作用明显。因此,将二次多元回归方程中的高吸水树脂(X_3)固定为0,从而得到生石灰(X_1)与水泥(X_2)对固化污泥7d无侧限抗压强度的交互作用方程,如下所示:

$$Y_7 = 490.58 + 33.08X_1 + 28.84X_2 + 19.42X_1X_2 - 27.69X_1^2 - 26.07X_2^2 \quad (2)$$

由交互作用方程可得出响应面图和等高线图,如图4所示。可知,当生石灰掺量在40%~46%时,在某一生石灰掺量下,固化污泥的无侧限抗压强度值随着水泥掺量的增加呈现出先增后减的趋势;当生石灰掺量大于46%时,固化污泥的无侧限抗压强度值随着水泥掺量的增加而增大。当水泥掺量在5%~11%时,在某一水泥掺量下,固化污泥的无侧限抗压强度值随着生石灰掺量的增加也表现出先增后减的变化;当水泥掺量大于11%时,固化污泥的无侧限抗压强度值随着生石灰掺量的增加而增大。因此,当生石灰掺量 $\geq 46\%$,且水泥掺量 $\geq 11\%$ 时,固化污泥的无侧限抗压强度值将达到最大,即图中颜色较深处。

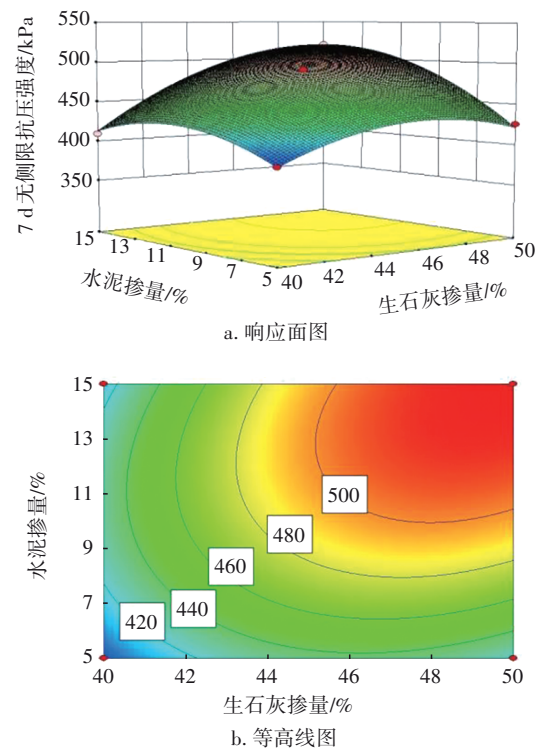


图4 7d龄期下生石灰与水泥交互作用的响应面图与等高线图

Fig.4 Response surface and contour map of strength interaction between lime and cement at the age of 7 days

2.2.4 最优配比确定

根据式(1),设置7d无侧限抗压强度的最大值为目标优化值,同时设置响应值不超过700 kPa,通过Design-Expert软件计算得到固化污泥中生石灰、水泥、高吸水树脂的最佳掺量分别为47.43%、13.11%、0.45%。生石灰和水泥的最佳掺量与响应面交互作用分析一致,说明计算结果较为可靠。在3种固化剂最佳掺量下,模型预测的固化污泥7d无侧限抗压强度为0.52 MPa。而实测固化污泥7d无侧限抗压强度为0.51 MPa,二者误差不超过5%,说明该模型拟合效果较好,能够较为准确地反映固化剂掺量对固化污泥无侧限抗压强度的影响,可为实际工程中固化剂掺量的计算提供指导。根据《公路路面基层施工技术细则》(JTG/T F20—2015)规定,用于二级及二级以下公路底基层的石灰类稳定土的7d无侧限抗压强度要求为0.5~0.7 MPa,该最佳配比下的固化污泥可以满足施工要求。

3 结论

① 通过单因素试验确定生石灰、水泥、高吸水树脂在固化污泥中的掺量范围分别为40%~

50%、5%~15%、0.3%~0.5%。

② 基于响应面法分析可知,生石灰、水泥和高吸水树脂掺量均对固化污泥的无侧限抗压强度有显著影响;影响无侧限抗压强度排序为生石灰>硅酸盐水泥>高吸水树脂;生石灰与水泥的交互作用显著。

③ 经响应面模型优化得到生石灰、水泥、高吸水树脂的最佳掺量为47.43%、13.11%、0.45%;模型预测该掺量配比下的固化污泥7 d无侧限抗压强度为0.52 MPa,实测值为0.51 MPa,二者误差不超过5%,说明模型拟合效果较好,具有较高的可信度,可为实际工程应用提供指导。

参考文献:

- [1] 崔競文,郑晓英,邱丽佳,等.城市给水厂污泥对污水中磷的动态吸附[J].环境工程学报,2020,14(4):917-924.
CUI Jingwen, ZHENG Xiaoying, QIU Lijia, *et al.* Dynamic adsorption of phosphorus in primary settling water by water treatment residuals in municipal water supply plant [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2020, 14(4): 917-924 (in Chinese).
- [2] 仇付国,许俊挺,卢超,等.给水厂污泥在水体净化领域中的应用研究进展[J].环境科学与技术,2018,41(5):111-119.
QIU Fuguo, XU Junting, LU Chao, *et al.* Progress on application of water treatment residual in water purification [J]. Environmental Science & Technology, 2018, 41(5): 111-119 (in Chinese).
- [3] GENCEL O, KAZMI S M S, MUNIR M J, *et al.* Feasibility of using clay-free bricks manufactured from water treatment sludge, glass, and marble wastes: an exploratory study [J]. Construction and Building Materials, 2021, 298: 123843.
- [4] RUZIQNA D P, SUWARTHA N, MOERSIDIK S S, *et al.* Aluminium recovery from water treatment sludge as coagulant by acidification[J]. Earth and Environmental Science, 2020, 448(1): 012045.
- [5] YAZDANI M, EBRAHIMI-NIK M, HEIDARI A, *et al.* Improvement of biogas production from slaughterhouse wastewater using biosynthesized iron nanoparticles from water treatment sludge [J]. Renewable Energy, 2019, 135: 496-501.
- [6] 贾尚华,申向东,解国梁.石灰-水泥复合土增强机制研究[J].岩土力学,2011,32(S1):382-387.
JIA Shanghua, SHEN Xiangdong, XIE Guoliang. Reinforcement mechanism of lime-cement soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(S1): 382-387 (in Chinese).
- [7] 邓东升,张铁军,洪振舜.河道疏浚废弃淤泥改良土的强度变化规律探讨[J].防灾减灾工程学报,2008,28(2):167-170.
DENG Dongsheng, ZHANG Tiejun, HONG Zhenshun. Undrained strength behavior of treated dredged clays with quick lime [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2008, 28(2): 167-170 (in Chinese).
- [8] 肖庆一,孙立东,封仕杰,等.石灰改良云南红黏土路基路用性能研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2020,39(10):79-84.
XIAO Qingyi, SUN Lidong, FENG Shijie, *et al.* Road performance of lime-modified Yunnan red clay roadbed [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2020, 39(10): 79-84 (in Chinese).
- [9] 程福周,雷学文,孟庆山,等.高含水率疏浚淤泥固化的力学性质试验研究[J].科学技术与工程,2015,15(1):295-299.
CHENG Fuzhou, LEI Xuewen, MENG Qingshan, *et al.* Experimental study on the mechanical properties of solidified dredging silt of high moisture content [J]. Science Technology and Engineering, 2015, 15(1): 295-299 (in Chinese).
- [10] KAZEMIAN S, HUAT B B K, MOAYEDI H. Undrained shear characteristics of tropical peat reinforced with cement stabilized soil column [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2012, 30(4): 753-759.

作者简介:赵吉(1984—),男,江苏金坛人,博士,高级工程师,主要研究方向为固体废弃物资源化利用。

E-mail:zhaoji1024@126.com

收稿日期:2022-12-05

修回日期:2023-01-09

(编辑:沈靖怡)