

文章编号:1673-9469(2023)03-0084-07

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2023.03.012

## 水泥-膨润土复合固化市政污泥强度试验研究

易进翔,方佳聪,于文霞,黄天河,郑振,江浩  
(东华理工大学土木与建筑工程学院,江西 南昌 330013)

**摘要:** 针对固化污泥的强度问题,以水泥作为复合剂的固化基质材料,采用材料比选强度试验,优选复合剂的外掺剂;开展了不同水泥添加量和不同膨润土添加量条件下固化污泥的强度试验,研究固化污泥的强度特性。结果表明:膨润土可作为优选的外掺剂,其特殊的离子交换和团粒化作用,使得膨润土复合水泥固化市政污泥相比于黏土、页岩效果更好;固化污泥土的无侧限抗压强度总体上随着水泥、膨润土添加量的增加而增大,试验表明水泥和膨润土复合可有效固化市政污泥,提高污泥的强度特性;基于试验数据建立的固化污泥土强度预测模型,可以对固化污泥土的无侧限抗压强度进行准确预测。

**关键词:** 污泥固化;材料比选;膨润土;应力应变关系;无侧限抗压强度

中图分类号:TU447

文献标识码:A

## Experimental Study on the Strength of Cement-bentonite Solidified Municipal Sludge

YI Jinxiang, FANG Jiacong, YU Wenxia, HUANG Tianhe, ZHENG Zhen, JIANG Hao  
(School of Civil and Architectural Engineering, East China University of Technology, Nanchang, Jiangxi 330013, China)

**Abstract:** For the strength issue of solidified sludges, cement is used as the solidification matrix material for the composite agent, and the material comparison strength tests are conducted to optimize the admixture of the composite agent. The strength tests are carried out on solidified sludges under different cement and bentonite additions to study the strength characteristics of solidified sludges. The results show that bentonite can be used as the preferred admixture, and its special ion exchange and agglomeration effect make bentonite composite cement have a better solidification effect on municipal sludges compared to clay and shale. The unconfined compressive strength of the solidified sewage soil generally increases with the increase of the cement and bentonite added. The experiment shows that the combination of cement and bentonite can effectively solidify municipal sludges and improve the strength characteristics. The strength prediction model for solidified soil based on the experimental data can accurately predict the unconfined compressive strength of solidified soil.

**Key words:** sludge solidification; material comparison and selection; bentonite; stress-strain relation; unconfined compressive strength.

随着我国都市圈的发展,城市化速度加快,城市污水产生量越来越多,随之城市污泥的产量也急剧增加,污泥的处置问题也越来越严峻<sup>[1]</sup>。污泥是污水处理的产物,其含水率高,力学性质差,且含有大量的有机质和重金属,如处理不当,易造

成环境二次污染和生态问题<sup>[2-3]</sup>。由于污泥成分复杂,在填埋之前需要经过预处理。固化技术是一种有效对污泥预处理的技术,污泥经固化处理后,力学性质明显提高,重金属含量和有机质含量明显减少,并且更容易处理和运输。

收稿日期:2023-02-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52168043);江西省教育厅科学技术研究项目(GJJ180386)

作者简介:易进翔(1987-),男,江西九江人,博士,讲师,从事固废处理方向研究。

在城市污泥固化处理技术研究方面,国内外学者围绕城市污泥固化处理中运用的固化剂进行了大量研究。采用单一水泥固化污泥有一定的局限性,如固化体的强度增长缓慢、固化成本增加、固化污泥土颗粒之间存在大量的微孔隙等问题,并不能达到预期效果<sup>[4-5]</sup>。朱春鹏等<sup>[6]</sup>以水泥、纸浆烧结灰复合固化疏浚淤泥,结果表明:纸浆渣烧结灰可提高水泥固化污泥的无侧限抗压强度,并且水泥的掺入含量越高,其强度的提高越显著。刘宇程等<sup>[7]</sup>以水泥、粉煤灰为复合固化剂,并利用硫酸铝、硅酸钠复配的促凝剂对含油污泥进行固化,研究发现,在最佳固化配方下,对污泥中的污染物有很好的固化作用。梁冰等<sup>[8]</sup>以普通硅酸盐水泥为基础的无机胶凝固化材料为主剂,垃圾焚烧底渣为辅助固化剂,开展了不同含量垃圾焚烧底渣与固化剂共同作用下,固化市政污泥工程特性研究。结果表明,垃圾焚烧底渣协同固化污泥可以起到积极效果,其骨料特性有助于固化体骨架结构形成,从而有助于提升固化体强度,同时能提供渗流通道,利于渗滤液的排出。当垃圾焚烧底渣添加量为40%~60%时,满足填埋要求。杨爱武等<sup>[9]</sup>采用自主研发的污泥固化剂,以水泥作为固化剂的主剂并外加两种固化剂辅剂,通过分析污泥固化土SEM图像表明,有大量的纤维状物质联结着土颗粒和颗粒团块,形成土骨架纤维的交互空间结构,提高了土体强度。李诗尧等<sup>[10]</sup>以硅酸盐水泥为主固化剂,脱硫石膏、粉煤灰、过硫酸钾为辅助固化剂对新疆污水处理厂污泥进行固化处理,结果表明:水泥基和电厂废弃的脱硫石膏能够有效改善污泥固化体的抗压强度,并得出了抗压强度最佳掺比和最经济掺比。梁仕华等<sup>[11]</sup>对浓缩液污泥进行固化处理,固化剂主剂为硫铝酸盐水泥,辅剂为垃圾焚烧底灰和飞灰,对固化污泥进行无侧限抗压强度试验,研究结果表明,飞灰和底渣可有效参与固化污泥土的骨架构建,提高试样的强度,飞灰和底渣对水泥固化试样28d强度的提升存在一个最优掺量。

通过上述研究我们发现,以水泥等单一固化剂对市政污泥进行处理,其效果并不理想,而以水泥为主剂,添加适量辅剂的固化剂对污泥的处理效果则很好。从经济性方面来说,以水泥和辅助材料混合的固化剂对污泥固化处理更具备应用前景。基于此,本文采用水泥作为复合剂的固化基质材料,对比分析膨润土、页岩和黏土作为复合剂

的外掺剂对固化污泥的影响。通过无侧限抗压强度试验,优选出膨润土作为复合剂的外掺剂,配置出一种新型城市污泥固化土并对其力学特性进行研究,以期用于建筑填土材料,指导相关工程实践。

## 1 试验材料与试验方案

### 1.1 试验材料

试验所需污泥取自南昌污水处理厂的脱水污泥,相关指标见表1。黏土取自江西南昌某建筑工地的红黏土,基本物理性质指标见表2;页岩选用硅质页岩,其物理性质见表3;膨润土选用钠基膨润土,其主要性能指标见表4;水泥为P. C32.5#复合硅酸盐水泥,水泥及三种复合剂的外掺剂主要化学成分见表5。

表1 污泥的基本物理指标

含水率/%	密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	比重	液限/%	塑限/%
327	1.18	1.60	286.3	30.2

表2 黏土的基本物理指标

最大干密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	最优含水率/%	天然含水率/%	液限/%	塑限/%	比重
1.693	19.7	23.1	39.2	21.4	2.4

表3 硅质页岩的物理性质

相对表观密度	表观密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	颜色	比表面积/(m <sup>2</sup> ·kg <sup>-1</sup> )
2.12	524	灰白	780

表4 膨润土主要物理性能指标

胶价质/(mL·15g <sup>-1</sup> )	吸蓝量/(g·100g <sup>-1</sup> )	湿压强/度/kPa	干压强/度/kPa	膨胀倍数	pH值
78	32	38.54	256	8	7.8

表5 固化材料的化学性质指标

材料	外掺剂			
	硅酸盐水泥	黏土	页岩	膨润土
主要成分	CaO、SiO <sub>2</sub> 、Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 、Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub> 、Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 、Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub> 、Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 、Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 、MgO	SiO <sub>2</sub> 、Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 、Na <sub>2</sub> O

### 1.2 试验方案

第一组为针对黏土、页岩、膨润土三种固化剂外掺剂的无侧限抗压强度比选试验方案,试验以水泥作为复合剂的固化基质材料,水泥添加量

25%, 养护龄期 28 d。通过比较试样的无侧限抗压强度, 从而优选出最优固化剂的外掺剂, 具体情况见表 6。

表 6 材料比选试验方案

试验编号	黏土添加量/%	页岩添加量/%	膨润土添加量/%
1-1	25	0	0
1-2	0	0	25
1-3	0	25	0
1-4	0	12.5	12.5

第二组为固化污泥无侧限抗压强度的试验方案, 试验考虑膨润土添加量、水泥添加量这两个因素。具体情况见表 7。

表 7 固化污泥的试验方案

试验编号	膨润土添加量/%	水泥添加量/%	龄期 T/d
2-1	5	5、15、25、35、45	28
2-2	15	5、15、25、35、45	28
2-3	25	5、15、25、35、45	28
2-4	35	5、15、25、35、45	28
2-5	45	5、15、25、35、45	28

### 1.3 试验方法

无侧限抗压强度试验采用 DW-2 型应变控制式无侧限压缩仪, 依据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)<sup>[12]</sup> 规范进行试验。每组土样进行 3 次平行实验, 3 次结果相对误差控制在 1% 以内。根据试验方案, 将搅拌均匀的试样装入内径为 39.1 mm、高度为 80 mm 的三瓣膜制样器中, 分 5 层进行击实, 然后将试样连同制样器一同放入标准养护箱中恒温恒湿养护。试样养护 24 h 后脱模, 将脱模后的试样放回到养护箱中继续养护, 待试样达到设计 28 d 养护龄期后, 进行无侧限抗压强度试验。如图 1 所示为固化污泥土试样, 图 2 为膨润土添加量 25%、水泥添加量 35% 试样的破坏形态图。



图 1 固化污泥土试样

Fig. 1 Solidified sludge soil sample



图 2 试样破坏形态图

Fig. 2 Failure modes of the sample

## 2 结果与分析

### 2.1 复合剂的外掺剂强度优选分析

如图 3 所示为各材料添加量的应力应变曲线, 从图中可以看出, 膨润土添加量为 25% 试样的无侧限抗压强度最大, 达到 84 kPa; 其次是黏土添加量为 25% 的试样, 无侧限抗压强度为 28 kPa; 页岩添加量 12.5% 和膨润土添加量 12.5% 复掺试样的无侧限抗压强度为 26 kPa; 页岩添加量为 25% 时, 试样的无侧限抗压强度为 14 kPa。试验结果表明, 作为固化剂的外掺剂固化市政污泥效果依次为: 膨润土 > 黏土 > 页岩。

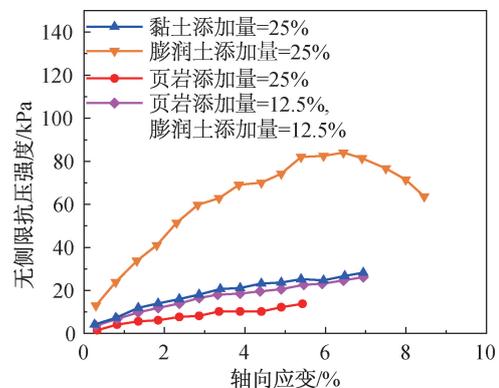


图 3 复合材料的比选

Fig. 3 Comparison and selection of composite materials

膨润土是一种主要由蒙脱石组成的非金属矿质产品, 如图 4 所示<sup>[13]</sup>, 由于膨润土特殊的晶格结构(硅氧四面体夹杂铝氢氧八面体), 在水泥基材料中掺入膨润土后产生了离子交换作用, 水泥水化产物中的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  可与膨润土中的硅酸钠(钾)和铝酸钠(钾)发生置换反应, 同时膨润土中的黏土微粒产生了团粒化作用吸水形成胶体, 提高固化污泥的水灰比, 从而提高其无侧限抗压强度<sup>[14]</sup>。页岩是由黏土矿物脱水胶结形成的岩石, 试验选用的硅质页岩吸水性低, 页岩和污泥在搅

拌过程中,自由水含量高,水灰比低。水泥-黏土复合固化污泥土强度形成主要通过水泥的水化反应消耗污泥中的水来促进颗粒间的粘结力的提升,但是没有离子交换过程。因此膨润土复合水泥固化市政污泥的效果优于页岩和黏土。基于此,本试验以水泥复合膨润土固化市政污泥。

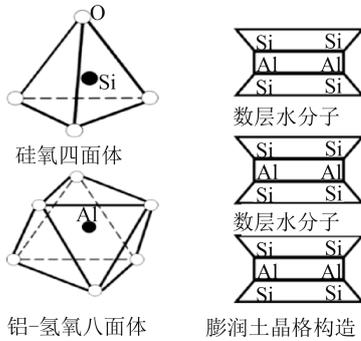


图 4 蒙脱石矿物结构

Fig. 4 Mineral structure of montmorillonite

## 2.2 水泥-膨润土复合固化污泥无侧限抗压强度试验结果分析

### 2.2.1 单轴抗压应力-应变曲线

图 5 为试样的无侧限抗压应力-应变曲线,从图中可知,试样的应力应变曲线总体上可以分为三个阶段:(1)初始加载阶段:应力水平较低,应力

随应变快速增长。(2)增长变缓阶段:应力随应变逐渐增大,斜率逐渐减小,当应力达到峰值,即试样的无侧限抗压强度,其对应的应变为破坏应变。(3)破坏后阶段:应力随应变的增加而逐渐减小,此时的曲线表示试样破坏后抵抗外力的残余变形阶段;不同膨润土添加量的固化污泥破坏应变主要分布在 2.5%~5.5%之间,且出现明显的应力峰,主要原因是水化反应产生的大量凝胶体,提高了土骨架的承载力,土体破坏形式由塑性破坏(无应力峰)变成脆性破坏(明显应力峰),且强度越大破坏应变越小,表明土体塑性越弱。

当水泥添加量小于 25%,固化污泥土随水泥添加量增加无侧限抗压强度增长较为缓慢,试样的应力应变曲线可以近似看成对数函数关系,这是由于固化污泥中没有足够的水化反应产物以形成土骨架结构<sup>[15]</sup>。当膨润土添加量在 15%~45%时,随着水泥添加量增多,固化污泥中无机颗粒的数量增多,水泥水化产物-水化硅酸钙凝胶(C-S-H)将膨润土颗粒和污泥颗粒包裹成一个整体,试样中水化产物增多、胶结力增强,此时固化污泥土中主要的受力成分为水泥和无机颗粒形成的凝胶体。当水泥添加量为 5%,膨润土添加量为 5%~45%时,固化污泥土最大无侧限抗压强度为 48 kPa;

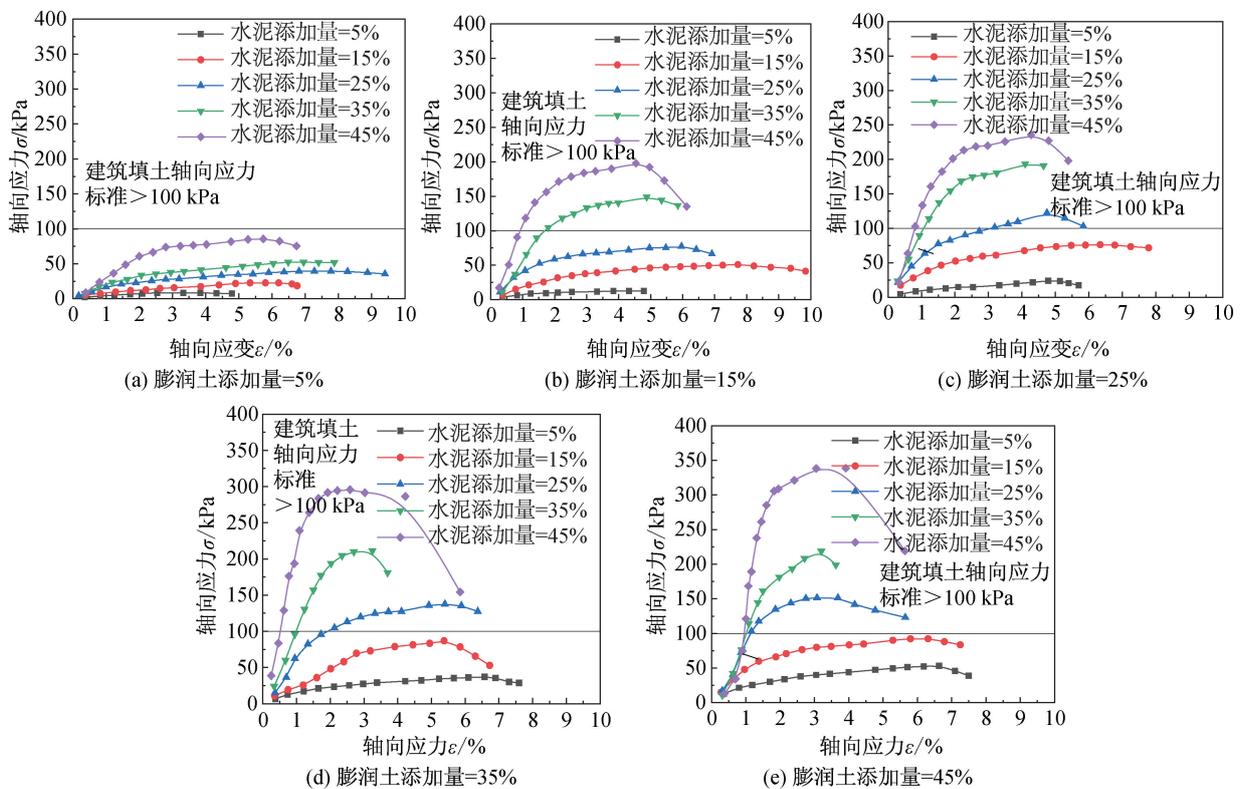


图 5 水泥添加量对固化污泥土应力应变曲线的影响

Fig. 5 Effect of cement content on stress-strain curve of solidified sludge soil

当膨润土添加量为 5%, 水泥添加量为 5%~45% 时, 固化污泥土无侧限抗压强度最大为 75 kPa, 增长了 50%。说明水泥水化后的凝胶体强度高于膨润土和污泥形成的混合结构面。膨润土添加量为 45% 时, 随着水泥添加量的增加, 无侧限抗压强度最高可达 348 kPa。试验表明, 污泥经水泥和膨润土复合固化以后, 提高了其强度特性。其中有 11 组污泥固化土试样无侧限抗压强度大于 100 kPa, 满足建筑填土强度要求, 具备建筑回填的基本力学特性<sup>[16]</sup>。

### 2.2.2 单轴无侧限抗压强度

本实验中分别控制水泥和膨润土的添加量进行固化试验, 即取水泥添加量(与污泥质量的比值)为 5%、15%、25%、35%、45%; 取膨润土添加量为(与污泥质量的比值) 5%、15%、25%、35%、45%。污泥固化土的无侧限抗压强度与水泥添加量、膨润土添加量的关系见图 6 和图 7 所示。

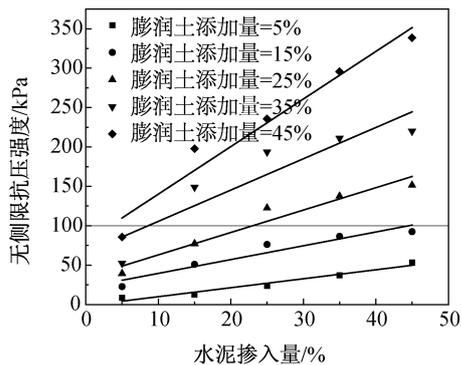


图 6 水泥掺量对无侧限抗压强度的影响

Fig. 6 Influence of cement content on unconfined compressive strength

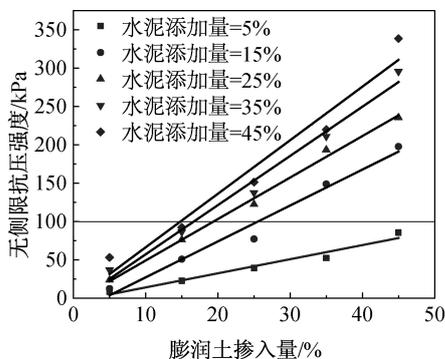


图 7 膨润土掺量对无侧限抗压强度的影响

Fig. 7 Influence of bentonite content on unconfined compressive strength

从图 6 可见, 当固化污泥的膨润土添加量水平

较高时, 随着水泥添加量的增加, 其固化污泥的无侧限抗压强度是迅速增加的, 并且水泥添加量越大, 其固化土强度的增加越显著。与之形成鲜明对比的是当膨润土添加量水平较低时, 在掺入相同水泥添加量的固化污泥强度值比掺入较高水平膨润土添加量水平低很多, 并且随着水泥掺入量的增加, 其强度的增加很缓慢。由此可知, 掺入膨润土可以较大幅度地提高固化土强度的增长。从图 7 可见, 当水泥添加量一定时, 随着膨润土添加量的增加, 其固化污泥的无侧限抗压强度呈线性增长关系, 并且水泥添加量越高, 固化污泥的强度提高越显著。

为了进一步分析水泥添加量和膨润土添加量对固化污泥土强度的影响关系。为此, 对固化污泥掺入的水泥和膨润土添加量与其无侧限抗压强度绘制成三维曲面并进行响应面分析, 通过回归分析, 构造全局测定量(响应值以及自变量)的全局近似, 然后用最小二乘法拟合出响应面模型来代替真实的响应面模型<sup>[17]</sup>。如图 8 所示, 固化污泥土无侧限抗压强度随水泥添加量和膨润土添加量的增加而增大, 但两种材料掺量的增幅曲线不同。水泥形成凝胶体填充固化污泥土的孔隙和膨润土颗粒直接填充孔隙的作用机理不同, 且两者的刚度大小是不同的。总体来看, 响应曲面等值线呈椭圆状, 说明水泥和膨润土对固化污泥土的无侧限抗压强度影响显著。

### 3 强度预测模型

众多学者<sup>[18-20]</sup>在固化土的强度预测方面, 进行研究并得出各种强度预测公式, 不过其原理大致相似。本试验固化污泥土的强度主要是水泥水化产物与膨润土之间作用形成, 基于本实验研究的结果, 建立强度预测模型。

$$k = \frac{\sigma_{i+1} - \sigma_i}{\sigma_i} \quad (1)$$

式中:  $k$  表示无侧限抗压强度固化系数;  $\sigma_i$  表示  $i$  添加量下的无侧限抗压强度, kPa;  $\sigma_{i+1}$  表示  $i+1$  添加量下的无侧限抗压强度, kPa。

通过图 6 可以看出, 固化污泥土强度随水泥掺量呈一次函数关系:

$$q_u = kx_1 + q_0 \quad (2)$$

式中:  $q_u$  为无侧限抗压强度, kPa;  $x_1$  为水泥添加量;  $k$ 、 $q_0$  均为试验参数; 各掺量下的试验参数如表 8 所示。

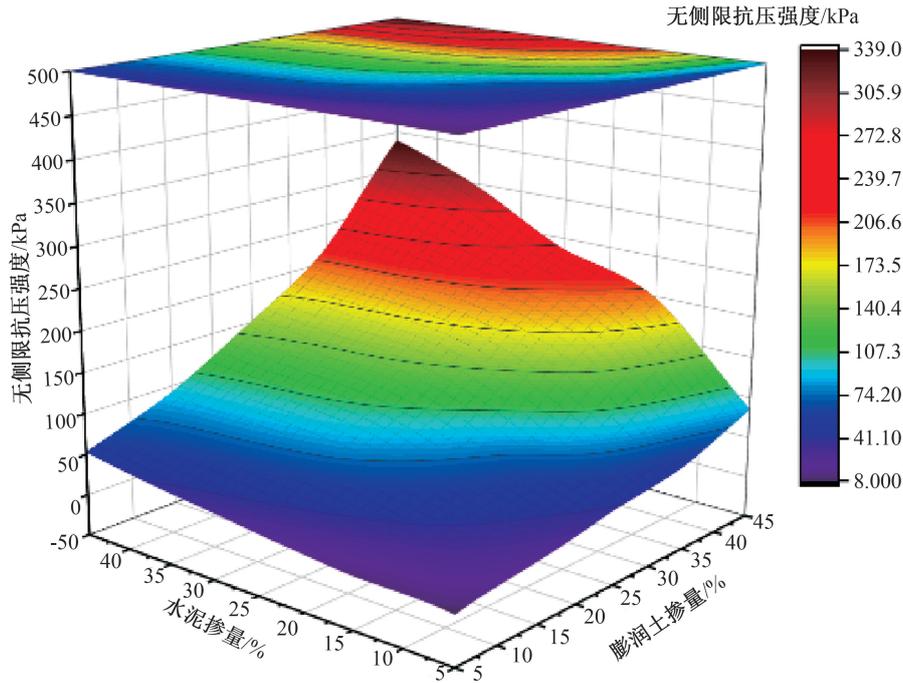


图 8 无侧限抗压强度和材料添加量响应面关系

Fig. 8 Relationship between unconfined compressive strength and material addition response surface

表 8 各掺量下的试验参数  $k$ 、 $q_0$

膨润土掺入量/%	$k$	$q_0$	$R^2$
5	1.138	1.352	0.96
15	1.751	21.978	0.92
25	2.843	34.541	0.94
35	3.973	65.802	0.83
45	6.038	79.688	0.96

从表 8 中可看出各膨润土添加量下的试验参数的拟合相关系数  $R^2$  均较大,这说明式(2)可以用于表示固化土无侧限抗压强度与材料添加量之间的关系。式(2)只反应强度与材料添加量之间的关系,从表 8 也可看出,试验参数  $k$ 、 $q_0$  随膨润土添加量增加均以不同幅度增大,可见试验参数  $k$ 、 $q_0$  与膨润土添加量之间有一定的相关性,为了研究膨润土添加量  $x_2$  对试样无侧限抗压强度的影响,对膨润土添加量掺量与试验参数  $a$ 、 $b$  进行回归拟合得到:

$$k = 0.002x_2^2 + 0.015x_2 + 1.037, R^2 = 0.99 \quad (3)$$

$$q_0 = 2.004x_2 - 9.469, R^2 = 0.98 \quad (4)$$

由此可见公式可较好地表示膨润土添加量和  $k$ 、 $q_0$  之间的关系,得到随水泥添加量和膨润土添加量的强度预测公式:

$$q_u = (0.0021x_1^2 + 0.01503x_2 + 1.03697)x_1 + 2.00398x_2 - 9.4693 \quad (5)$$

式中: $x_1$  为水泥添加量, $x_2$  为膨润土添加量。

### 4 结论

试验选取水泥作为污泥固化土的主剂,以页岩、黏土、膨润土作为复合剂的外掺剂进行材料比选试验。通过无侧限抗压强度试验,对固化污泥土的力学性能进行研究得出以下结论:

1)与页岩、黏土相比,膨润土作为复合剂的外掺剂固化市政污泥,因为其特殊的团粒化作用和离子交换作用,其固化效果更好。

2)当水泥添加量一定时,随着膨润土添加量的增加,其固化污泥的无侧限抗压强度呈线性增长关系,并且水泥添加量越高,固化污泥的强度提高越显著。

3)本文研究了 25 组水泥膨润土复合固化后的污泥强度,其中有 11 组配比达到了建筑填土的要求,占比 44%。

4)基于试验数据建立的固化污泥土强度预测模型,可以对水泥膨润土复合固化市政污泥土无侧限抗压强度进行准确预测。

### 参考文献:

[1] 陈萍,林伟岸,占鑫杰,等. 渗滤液浸泡对深度脱水污泥强度和渗透性能的影响[J]. 岩土力学, 2013, 34(2):337-341.  
 [2] VIEIRA R F, MORICONI W, PAZIANOTTO R A A. Re-

- sidual and Cumulative Effects of Soil Application of Sewage Sludge on Corn Productivity[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2014, 21(10):6472-6481.
- [3] 杨爱武,胡 垚,杨少坤. 城市污泥新型固化技术及其力学特性[J]. *岩土力学*, 2019, 40(11):4439-4449.
- [4] SUN X, ZHU W, QIAN X, et al. Exploring Cementitious Additives for Pretreatment of High-early-strength Sewage Sludge from the Perspective of the Rapid Generation of Nonevaporable Water [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2014, 26(5):878-885.
- [5] 胡聚豪. 城市污泥固化技术及影响因素的试验研究[D]. 杭州:浙江工业大学, 2013.
- [6] 朱春鹏,吴海清,刘汉龙,等. 纸浆渣烧结灰基本特性及其在污泥固化中的试验研究[J]. *岩土力学*, 2012, 33(10):2979-2984.
- [7] 刘宇程,徐俊忠,陈 凤,等. 粉煤灰复合固化剂处理含油污泥实验研究[J]. *环境工程*, 2014, 32(5):73-76.
- [8] 梁 冰,胡学涛,陈亿军. 垃圾焚烧底渣协同固化市政污泥的工程特性[J]. *环境工程学报*, 2016, 10(11):6705-6710.
- [9] 杨爱武,胡 垚. 新型城市污泥固化土工程特性及微观机理[J]. *岩土力学*, 2018, 39(S1):69-78.
- [10] 李诗尧,赵 纯,孙志华,等. 新疆地区电厂脱硫石膏增强的水泥基污泥固化剂的制备及性能分析[J]. *环境工程*, 2019, 37(3):146-151.
- [11] 梁仕华,冯德鑫. 硫铝酸盐水泥协同垃圾焚烧副产物固化浓缩液污泥的强度和水稳定性试验研究[J]. *岩土力学*, 2022, 43(6):1453-1468.
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部,国家市场监督管理总局. GB/T 50123—2019, 土工试验方法标准[S]. 北京:中国计划出版社, 2019.
- [13] 李广信,张丙印,于玉珍. 土力学[M]. 北京:清华大学出版社, 2013.
- [14] 肖 佳,孟庆业,郭明磊,等. 膨润土改善水泥基材料抗低温硫酸盐侵蚀性能[J]. *建筑材料学报*, 2016, 19(1):156-161.
- [15] 何 俊,管家贤,张 磊,等. 干湿循环对固化污泥微观结构及强度的影响[J]. *水利水电科技进展*, 2022, 42(4):39-44.
- [16] 林 城. 以膨润土为辅助添加剂固化/稳定化污泥的试验研究[D]. 南京:河海大学, 2007.
- [17] 朱春风. 硅藻土-玄武岩纤维复合改性沥青混合料路用性能及力学特性研究[D]. 长春:吉林大学, 2018.
- [18] 蒙 强,邵 俐,施倩芸. 粉煤灰水泥土力学特性试验研究[J]. *上海理工大学学报*, 2017, 39(5):490-496.
- [19] 蒋卓吟,李 琴. 固化滇池泥炭土抗压强度的实验研究[J]. *硅酸盐通报*, 2018, 37(10):3193-3196+3205.
- [20] 杨爱武,钟晓凯,梁 超,等. 吹填泥浆固化及长期力学性能试验研究[J]. *岩土力学*, 2017, 38(9):2589-2596.

(责任编辑 王利君)