

# 吹填淤泥土的双掺固化和配比优化试验研究

秦亮<sup>1</sup>, 陈志敏<sup>2,3\*</sup>, 卢永飞<sup>2,3</sup>

(1. 甘肃省交通规划勘察设计院股份有限公司, 甘肃 兰州 730030; 2. 兰州交通大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730070;  
3. 兰州交通大学 甘肃省道路桥梁与地下工程重点实验室, 甘肃 兰州 730070)

**摘要:** 为了研究水泥和氧化钙双掺固化改良吹填淤泥土的最优配比, 该文基于正交试验开展了双掺固化土的改性分析, 最后通过模糊综合评价法对各配比方案进行了量化优选。结果表明: ① 同等比例掺入条件下 (掺入量 1.0%~4.0%), 最优含水率与掺入量呈正线性相关, 而最大干密度呈负线性相关; 非同等比例下, 规律不甚明显, 但是相对水泥来说, 氧化钙的减水效果要优于水泥的效果; ② 试样的无侧限抗压强度受水泥和氧化钙相对比例影响, 等比例掺入时呈正相关, 但总体上水泥在双掺固化土强度增长过程中起主要作用; ③ 采用模糊综合评价法, 综合考虑项目固化施工成本、抗压强度、击实特性等多种因素认为山东玉龙岛炼化项目吹填淤泥的最优配合比方案是采用 2.0% 水泥 + 1.5% 氧化钙双固化, 此时试样的最优含水率为 23.3%, 最大干密度为 1.68 g/cm<sup>3</sup>, 无侧限抗压强度为 440 kPa。

**关键词:** 吹填淤泥; 水泥; 氧化钙; 双固化改性; 配合比; 模糊综合评价

中图分类号: U414

文献标志码: A

## Experimental Study on Double-Mixture Solidification and Ratio Optimization of Dredger Fill Sludge

QIN Liang<sup>1</sup>, CHEN Zhimin<sup>2,3\*</sup>, LU Yongfei<sup>2,3</sup>

(1. Gansu Province Transportation Planning Survey & Design Institute Co., Ltd., Lanzhou, Gansu 730030, China; 2. School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou, Gansu 730070, China; 3. Key Laboratory of Road & Bridge and Underground Engineering of Gansu Province, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou, Gansu 730070, China)

**Abstract:** In order to study the optimal ratio of cement and calcium oxide by double-mixture solidification for improving dredger fill sludge, the soil modification results by double-mixture solidification were analyzed based on orthogonal experiments. Finally, the fuzzy comprehensive evaluation method was used to quantitatively optimize each ratio scheme. The results show that: ① Under the same addition ratio (addition amount of 1.0%–4.0%), there is a positive linear correlation between the optimal moisture content and the addition amount, and there is a negative linear correlation between the optimal moisture content and the maximum dry density. Under non-equal addition ratios, the law is not obvious. However, compared to cement, the water-reducing effect of calcium oxide is better. ② The unconfined compressive strength of the sample is affected by the relative ratio of cement and calcium oxide, which is positively correlated when cement and calcium oxide are added in the same amount, but in general, cement plays a major role in the strength growth of soil by double-mixture solidification. ③ By taking the fuzzy comprehensive evaluation method and considering various factors such as project solidification construction cost, compressive strength, and compaction characteristics, it is believed that the optimal ratio scheme for dredger fill sludge in Shandong Yulongdao Refining and Chemical Project is 2.0% cement + 1.5% calcium oxide for double-mixture solidification. The optimal moisture content of the sample is 23.3%, and the maximum dry density is 1.68 g/cm<sup>3</sup>. The unconfined compressive strength is 440 kPa.

**Keywords:** dredger fill sludge; cement; calcium oxide; double-mixture solidification for modification; mixture ratio; fuzzy comprehensive evaluation

收稿日期: 2023-11-20 (修改稿)

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (编号: 11662007)

作者简介: 秦亮, 男, 大学本科, 工程师. E-mail: 949187883@qq.com

\*通信作者: 陈志敏, 男, 博士, 教授. E-mail: zylwdeq@163.com

## 0 引言

吹填土同时也被称做充填土,专门指在河道或海床淤泥经过清淤船抽取搅拌后经过高压管道吹填至指定区域中,后经过固结、排水等一系列处理后而用于地基的土体<sup>[1]</sup>。沿海地区经济发展过程中大规模存在用地资源紧张的问题,通过吹填淤泥质土围海造陆,能够实现经济且相对环保发展的目标。

淤泥质土由于其本身的土体特性,其力学性质呈现“二低三高”特性,主要体现在力学强度低、透水系数低(渗透系数在 $1 \times 10^{-6}$  cm/s以下)、压缩性高、含水率高和有机质含量高<sup>[2]</sup>。此类岩土常用的处理措施多为静置、沉降和自然固结,待土体表层形成一定强度后再进行加固处理,但是其缺点是施工周期长,无法满足快速建设需求<sup>[3-4]</sup>。因此,如何研究出一种快速、经济的吹填淤泥土处理方法,既考虑吹填土的固有特征、又考虑工程建设时效和成本,对于沿海地区此类岩土体的处理具有重要的工程价值和研究意义。目前关于固化土的研究中,主流的固化材料分为无机型、离子型、有机聚合物类、生物酶类4大类型<sup>[5-8]</sup>。其中水泥和氧化钙(俗称生石灰)作为价格低廉、产量大的无机材料,是进行大规模吹填软土改良的最佳材料。例如,李俊才等<sup>[9]</sup>将水泥作为软土固化的研究材料,利用现场及室内土样固化后的微观对比提出了固化土的微观特征变化过程;杨爱武等<sup>[10]</sup>通过大型沉降柱试验模拟了天津滨海吹填软土的沉降过程,对其基本物性特征进行了研究,认为吹填软土工程性质差,无法满足工程需求,同时提出基于水泥和氧化钙等碱性材料固化的改良方向;王景霞<sup>[11]</sup>重点研究了水泥和粉煤灰作为掺和剂在固化高岭土中的力学特性和铜离子污染情况,结论认为铜离子浓度是造成固化剂性状劣化的一个重要因素;吴越鹏等<sup>[12]</sup>将氧化钙和石粉作为固化剂,通过4种不同类型的配比试验发现土对 $\text{OH}^-$ 和CaO的吸收量与水化硅酸钙浓度成反比,这是影响淤泥质土固化的一个重要指标;刘银芳等<sup>[13]</sup>对粉质黏土类的水泥搅拌土进行了固化剂配比试验,并重点对水泥砂浆的固化过程和催化机理进行了研究,分析其微观结构并提出了固化模型。从以上研究成果可以看出:大部分研究集中于固化剂的成分、机理的研究,关于水泥+氧化钙双掺固化的定量化研究成果相对较少,尤其

是两者双掺固化在无侧限抗压强度和经济性量化比较方面没有相应的研究。同时,量化配比方案添加剂量大,造成工程成本过高,因此有必要对低掺量、低价格水泥和氧化钙复配的技术路径开展研究。

针对这些问题,本文以山东省裕龙岛4 000万t炼化项目地基吹填淤泥土为研究对象,根据该工程实际情况,开展该项目的吹填淤泥土利用水泥和氧化钙双固化改良的室内研究,分析其在不同固化方式和养护龄期下的各项基本物理性质和工程特性。

## 1 试验材料

### 1.1 吹填淤泥土

本试验所用淤泥取自烟台龙口裕龙岛石化项目地基预处理工程,其位于山东省龙口市的渤海龙口湾南部海域,临近龙口市与招远市边界,属于吹填淤泥造岛。研究区需要处理的软基面积为44.63万 $\text{m}^2$ ,吹填土成分以淤泥土为主,厚度一般为3.0~5.5 m,由于淤泥吹填时间短,而工程施工时间紧,无法满足自重固结要求。吹填淤泥初期呈流塑状态的泥浆,含水率超过100%,无强度。经复式负压快速固结处理后其含水率降低至32.0%,处于可塑状态。

室内土工试验获取研究所用吹填淤泥土基本物理性质为:天然含水率34.0%~34.2.0%,天然密度 $1.79 \sim 1.81 \text{ g/cm}^3$ ,相对密度2.73,孔隙比1.24,液限39.5%~39.7%,塑限23.6%~23.8%;击实试验获取该淤泥土样的最优含水率为20.5%,最大干密度为 $1.74 \text{ g/cm}^3$ 。用筛分法和密度计法联合测试颗粒组成,淤泥的级配曲线如图1所示。

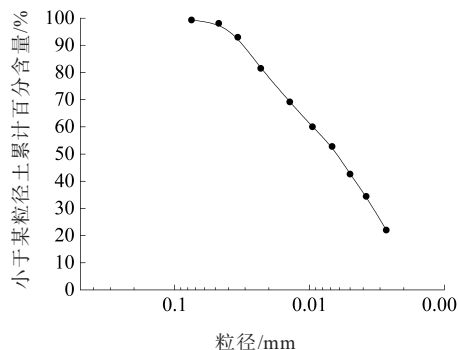


图1 试验土样的颗分曲线

Figure 1 Particle gradation curve of test soil sample

### 1.2 固化剂

采用水泥和氧化钙双固化改良思路。其中,水泥选用32.5级普通硅酸盐水泥,其基本性能参数如

表 1 所示;氧化钙采用Ⅱ级钙质氧化钙,主要化学成分如表 2 所示。

2 试验方案

根据贺佐跃等<sup>[14]</sup>、董博闻等<sup>[15]</sup>、李海龙等<sup>[16]</sup>关于淤泥质土使用水泥和氧化钙改性后的抗压强度试验成果:固化土中的无侧限抗压强度试验中同时掺入

水泥和氧化钙的固化效果要优于单一固化剂的固化效果;另外,水泥固化过程中存在一个最低掺入比,而氧化钙固化中存在一个合适掺入比。从工程经济角度出发,大规模吹填淤泥改良使用的固化剂掺量越小,成本越低。寻找低掺量固化改良方案是试验的研究方向。所以,本文将通过击实特性、强度指标来获取满足路用性能的低配合比方案。

表 1 水泥基本参数

Table 1 Basic parameters of cement

烧失量/ %	80 μm 筛余量/%	凝结时间/min		28 d 强度/MPa	
		初凝	终凝	抗折强度	抗压强度
2.75~2.81	4.0~4.2	360~380	400~410	6.5~6.8	35.4~38.5

表 2 氧化钙主要化学成分含量

Table 2 Contents of main chemical components of calcium oxide

主要成分	质量百分比/%
SiO <sub>2</sub>	4.34
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.71
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.12
CaO	57.01
MgO	1.52
烧失量	33.91

2.1 击实试验方案

由于吹填淤泥土属于细粒含量很高的黏性土,击实试验选用湿法击实,由经验数据可知细粒土的最优含水率一般为液限的 0.55~0.65。试验过程中首先从不同级配条件下改良土的液塑限以及素土的最优含水率和最大干密度综合分析并预估一个最优含水率值  $w_{估}$ ,以  $w_{估} \pm \Delta w$  交叉进行击实试验,每次试验设定含水率差距为 2.0%。试验后计算出干密度并作出拟合曲线。

2.2 无侧限抗压强度试验方案

试验选择烘干后吹填淤泥样品,根据固化剂配合比调至最优含水率和最大干密度,在此基础上制备试验样品依据土工试验规范进行常规单轴抗压强度试验,试样模具采用直径 39.8 mm,高 100 mm,模具体积 126 cm<sup>3</sup>。根据《堤防工程设计规范》(GB 50286—2013)中不同建筑物等级的压实度要求,本文制样过程中压实度采用 0.90、0.93 和 0.95 共 3 级压实标准。

2.3 试验配比方案

试验所采用的配比方案分 3 组,第 1 组为同等比例掺入;第 2 组为水泥定量、氧化钙变量;第 3 组为氧化钙定量、水泥变量。在李海龙等<sup>[16]</sup>试验成果的基础上进一步缩小参量变化幅度,本次试验固定水泥和氧化钙掺入量为 1.5%,每次累加 0.5%,每一个配比试验同时选择 0.90、0.93 和 0.95 共 3 个不同压实度制作试样,每份试验制作 3 个平行试样并取平均值。试验组配比方案见表 3。

3 双固化改性成果分析

3.1 击实特性分析

(1) 同等比例掺入

将水泥和氧化钙按 1%、2%、3% 和 4% 的同等比例掺入后进行击实获取其击实曲线,结果如图 2 所示。从图 2 可以发现:同等比例的水泥和氧化钙掺入后,样品的最大干密度逐步降低,最优含水率逐步增大,呈现近线性的关系。初步分析认为:水泥和氧化钙的掺入会与吹填淤泥内的水分发生水解和水化,从而消耗一定量的水,当掺量增加时对水的消耗也会增加;同时,水化水解作用降低了淤泥质颗粒的表面扩散双电层厚度,增加土颗粒摩擦力,从而对抗击实功的能力有所增长,干密度降低。

为了进一步获取同等比例掺入量条件下的干密度和含水率的直接关系,利用 Origin 生成散点图,见图 3。从图 3 可以发现:同等比例掺入条件下(掺入量 1%~4%),吹填淤泥掺入增量与最优含水率和最大干密度可以通过线性公式来进行预测。

表3 试验组配比方案  
Table 3 Ratio scheme of test group

编号	配比方案	压实程度	编号	配比方案	压实程度	编号	配比方案	压实程度
1	水泥+氧化钙 1.0%	0.91	5	水泥1.5%+氧化钙 1.0%~4.0%	0.91	9	氧化钙1.5%+水泥 1.0%~4.0%	0.91
		0.93			0.93			0.93
		0.96			0.96			0.96
2	水泥+氧化钙 2.0%	0.91	6	水泥2.0%+氧化钙 1.0%~4.0%	0.91	10	氧化钙2.0%+水泥 1.0%~4.0%	0.91
		0.93			0.93			0.93
		0.96			0.96			0.96
3	水泥+氧化钙 3.0%	0.91	7	水泥2.5%+氧化钙 1.0%~3.0%	0.91	11	氧化钙2.5%+水泥 1.0%~3.0%	0.91
		0.93			0.93			0.93
		0.96			0.96			0.96
4	水泥+氧化钙 4.0%	0.91	8	水泥3.0%+氧化钙 1.0%~3.0%	0.91	12	氧化钙3.0%+水泥 1.0%~3.0%	0.91
		0.93			0.93			0.93
		0.96			0.96			0.96

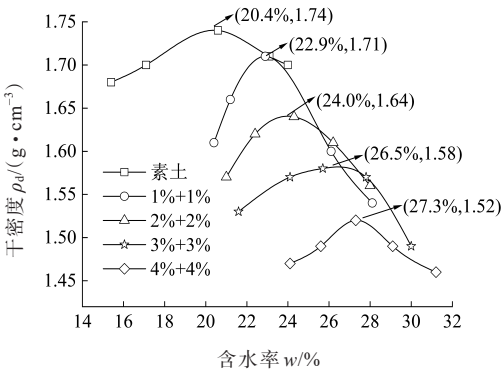


图2 等比掺量干密度与含水率的关系

Figure 2 Relationship between dry density and moisture content at the same addition ratio

最优含水率 $w_{\text{最优}}$ 与同等比例掺入量 $X$ 的关系:

$$w_{\text{最优}} = 1.82X + 19.33 \quad (1)$$

最大干密度 $\rho_{\text{dmax}}$ 与同等比例掺入量 $R$ 的关系:

$$\rho_{\text{dmax}} = -0.06X + 1.73 \quad (2)$$

(2) 水泥定量,氧化钙变量掺入

根据表3确定的试验配合比方案,设定水泥的掺入量为固定值,改变氧化钙的掺入量,试验结果见图4。

固定比例的水泥掺量试验成果表明:在水泥含量为1.5%和2.0%[图5(a)、5(b)]情况下,试样的最优含水率随着石灰掺量的增加而呈现明显的增大趋势,但是最大干密度呈现明显的减小趋势;在水泥掺入量为2.5%时,石灰掺量的增加对于最优含水率和最大干密度的影响逐步减弱,幅度变小。当掺入量达到3.0%时,随着石灰掺入加大,最优含水率基本上保持为26%~27%,此时最大干密度为1.52~1.61 g/cm³。

(3) 氧化钙定量,水泥变量掺入

将氧化钙掺入量设为固定值,改变水泥掺入量,

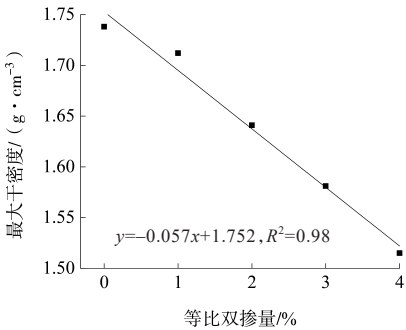
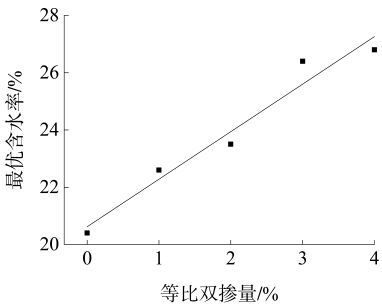


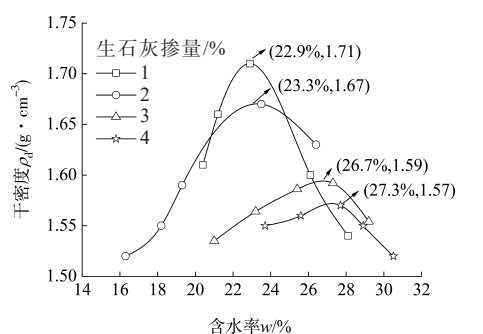
图3 同等比例掺量与含水率、干密度拟合关系

Figure 3 Fitting relationship between dry density and moisture content at the same addition ratio

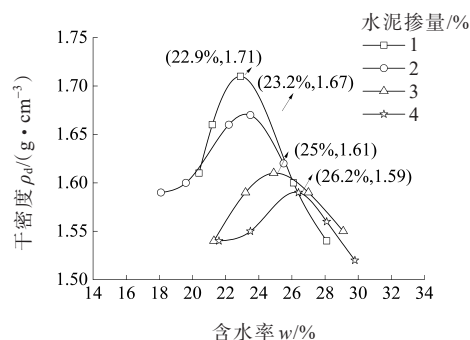
击实试验结果见图5。

从图5(a)、(b)可以看出:固定氧化钙掺入量之后,最优含水率与水泥掺入量呈正相关,最大干密度与水泥掺入量呈负相关;当固定石灰含量为2.5%时,随着掺入的水泥量的增加,其最优含水率基本上维持在25.3%~26.7%,最大干密度变化亦较小;当氧化钙掺入量增加到3.0%时,基本上样品的最优含水率保持不变,最大干密度逐步减小到1.52 g/cm³。

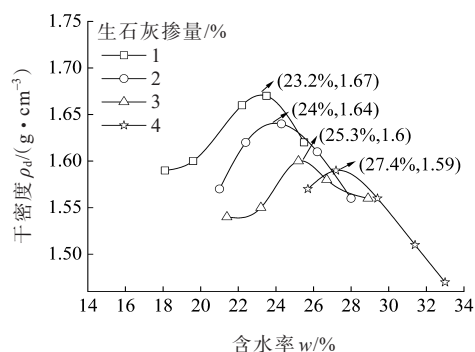
比较图4、5的曲线规律可以发现:氧化钙的吸水



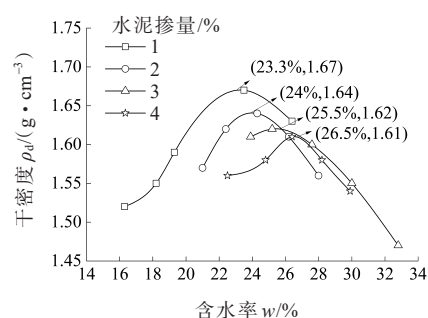
(a) 水泥掺入量 1.5%



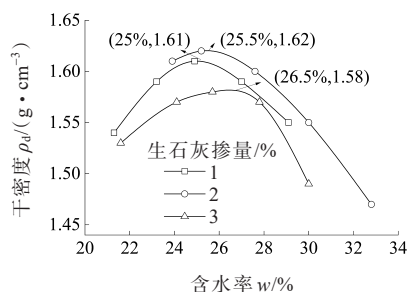
(a) 氧化钙定值 1.5%



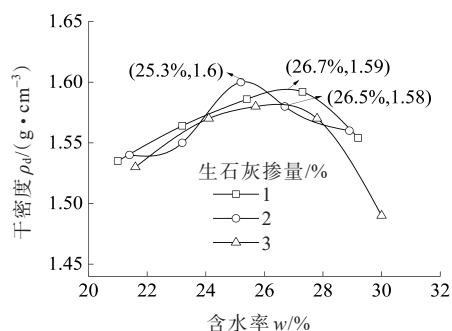
(b) 水泥掺入量 2.0%



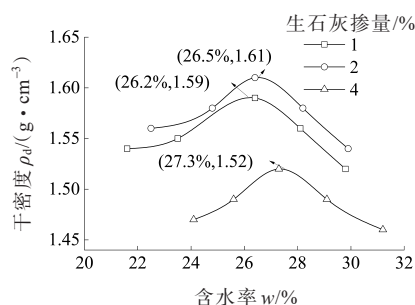
(b) 氧化钙定值 2.0%



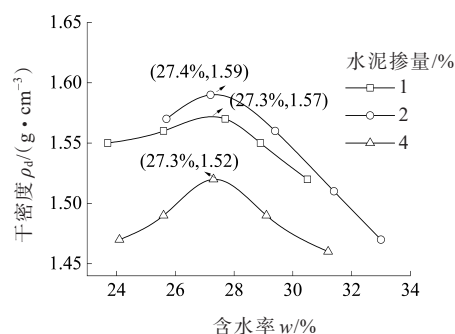
(c) 水泥掺入量 2.5%



(c) 氧化钙定值 2.5%



(d) 水泥掺入量 3.0%



(d) 氧化钙定值 3.0%

图4 水泥等量氧化钙成倍掺入干密度与含水率的关系

Figure 4 Relationship between dry density and moisture content with constant cement and multiplied calcium oxide

效果更强,对最优含水率的影响更大,说明氧化钙固化改性方面的减水效率明显高于水泥。

### 3.2 无侧限抗压强度分析

#### (1) 同等比例掺入

图5 氧化钙等量水泥成倍掺入干密度与含水率的关系

Figure 5 Relationship between dry density and moisture content with constant cement and multiplied calcium oxide

选择同等比例水泥和氧化钙作为固化剂,进行0.91、0.93和0.96共3种压实条件下的不同养护时间后的抗压强度试验,结果见图6。



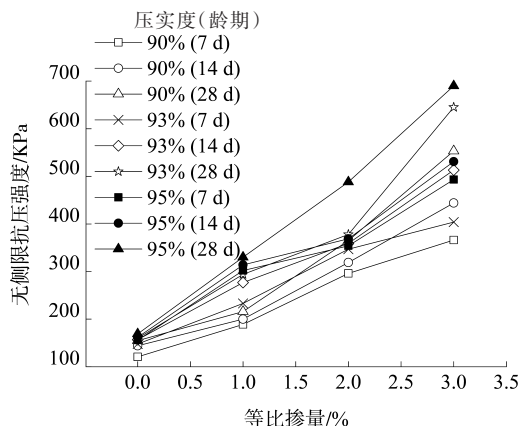


图6 固化土无侧限抗压强度与等比掺量的关系

Figure 6 Relationship between unconfined compressive strength of solidified soil and same addition ratio

由图6可以看出:在等比例掺量工况下,试样的抗压强度与掺入量呈线性正相关。造成这一现象的原因为:在使用同样质量的石灰和水泥进行淤泥土改性过程中,适合土中自由水所赋存的钙离子浓度提高,增加土颗粒之间的硬凝反映效率,增加了土颗粒之间的连接力。

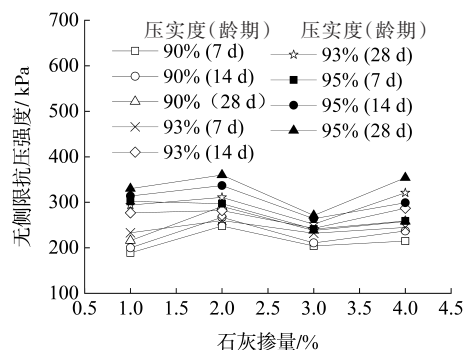
### (2) 水泥定量,氧化钙变量

固定水泥掺量,改变氧化钙掺量,其在不同压实度和养护龄期下的无侧限抗压强度试验结果见图7。

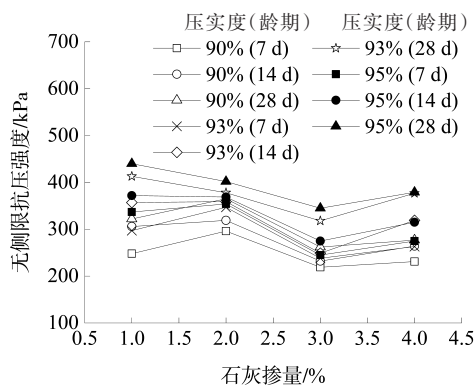
由图7可知:水泥掺入量在低于2.0%的工况下,试样的力学强度与掺量之间无明显的线性相关关系。冒小丹等<sup>[17]</sup>、卫亚洲等<sup>[18]</sup>研究认为,利用氧化钙改性淤泥质土存在一个最优掺合比例,在这一配比方案下固化后的淤泥土中的氢氧根离子处于某种动态平衡,导致土体的力学强度达到最佳,当掺入量大于或者小于这一最优比例时,固化土中的氢氧根离子就会形成自由态,软化土体造成强度降低。在水泥掺入量为2.5%和3.0%的工况下,可以明显看出,随着石灰掺入量的增加,改良后的淤泥质土强度明显提升。造成这一规律的原因为:水泥中钙离子浓度的增加,加速了其与黏性土中的硅氧化物的火山灰反应,从而加速形成了凝胶聚合物,这些聚合物可以作为稳定剂来提高土体的强度。

### (3) 氧化钙定量,水泥变量

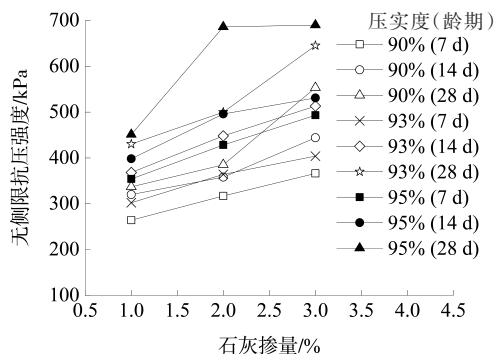
设定氧化钙掺入比为固定值,改变水泥掺量,其在不同压实度和养护龄期下的无侧限抗压强度试验结果见图8。



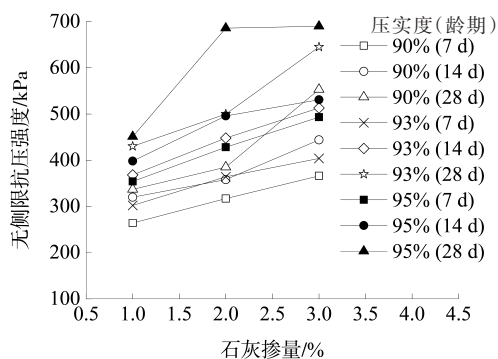
(a) 水泥掺量1.5%



(b) 水泥掺量2.0%



(c) 水泥掺量2.5%



(d) 水泥掺量3.0%

图7 固化土无侧限抗压强度与氧化钙掺量的关系

Figure 7 Relationship between unconfined compressive strength of solidified soil and addition amount of calcium oxide

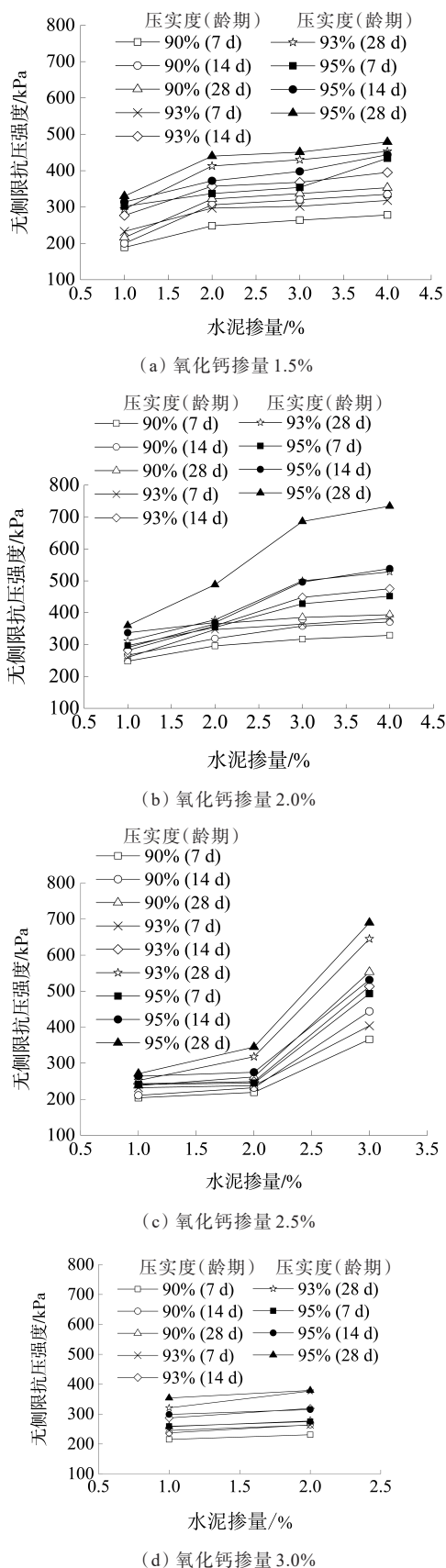


图 8 固化土无侧限抗压强度与水泥掺量的关系

Figure 8 Relationship between unconfined compressive strength of solidified soil and addition amount of cement

从图 8 可以看出:氧化钙掺入量为 1.5%~2.0% 时,淤泥质土改良后的强度与水泥掺入量有明显的正相关关系。但当掺入量为 2.5% 和 3.0% 时,水泥掺量先有一个陡增趋势,然后趋于平缓,尤其在养护龄期的中后期(14~30 d),样品的抗压强度增加。可以认为,水泥对于淤泥质土的强度起到控制作用。

#### 4 固化剂配合比优化研究

从上述分析可知,同等比例掺量下固化剂加入越多,固化改性效果越好;而非同等比例掺量下,固化改性规律不明显。从工程实际角度出发,本文提出利用模糊综合评价法寻找出一种能够平衡工程施工成本和改良效果的最优配合比方案,评价流程如下。

##### (1) 确定备选试验配比

根据上一节试验成果初步分析,水泥和氧化钙配合比在 1.5%+2.0%、2.0%+1.5%、2.5%+2.0% 以及 3.0%+1.5% 这 4 种情况下,具有较好的强度指标或者击实特性,将其作为备选集:

$$\bar{X} = \{x_1, x_2, x_3, x_4\} = \{1.5\% + 2.0\%, 2.0\% + 1.5\%, 2.5\% + 2.0\%, 3.0\% + 1.5\%\} \quad (3)$$

##### (2) 确定评价因子和评分标准

选择配合比的固化成本、击实特性、抗压强度和压实度作为评价因子。根据现有工程实际,水泥和氧化钙掺入的成本为:(1.5% 水泥+2.0% 氧化钙) 21.4 元/m<sup>3</sup>, (2.0% 水泥+2.0% 氧化钙) 27.5 元/m<sup>3</sup>, (2.5% 水泥+2.0% 氧化钙) 33.6 元/m<sup>3</sup>, (3.0% 水泥+1.5% 氧化钙) 32.1 元/m<sup>3</sup>。固化成本越低,击实特性越好,抗压强度越高,那么评分越高,4 种固化配比方案各评价指标结果见表 4,再把每个评价等级看作一个模糊向量  $\bar{C}$ ,分值为 -1~2,见表达式(4):

$$\bar{Y} = \{y_1, y_2, y_3, y_4\} = \{-1, 0, 1, 2\} \quad (4)$$

表 4 技术方案评价隶属度

Table 4 Affiliation of technical scheme comments

评价等级	不同 C 值的隶属度分布			
	-1	0	1	2
好	0.00	0.00	0.33	0.67
较好	0.00	0.25	0.50	0.25
一般	0.25	0.50	0.25	0.00
差	0.67	0.33	0.00	0.00

### (3) 确立权重

考虑固化土用作基础填筑料的强度值和经济性成果要求高一些,设定固化成本的权重为0.30,无侧限抗压强度的权重值定为0.30,击实特性和压实度采用的权重值相对低一点,分别为0.25和0.15。建立因素权重集为:

$$\vec{A} = \{a_1, a_2, a_3, a_4\} = (0.25, 0.3, 0.15, 0.3) \quad (3)$$

### (4) 模糊综合评价

1.5%水泥+2.0%氧化钙配比的综合评价矩阵为:

$$\begin{aligned} \vec{B}_{1.5\%+2.0\%} &= \vec{A} \times \vec{X}_{1.5\%+2.0\%} = \\ (0.25, 0.30, 0.15, 0.30) &\begin{bmatrix} 0.25 & 0.50 & 0.25 & 0 \\ 0 & 0 & 0.33 & 0.67 \\ 0 & 0.25 & 0.50 & 0.25 \\ 0 & 0.25 & 0.50 & 0.25 \end{bmatrix} = \\ &(0.06, 0.24, 0.38, 0.32) \end{aligned} \quad (4)$$

采取同样的计算方法,可以计算出:

$$\begin{aligned} \vec{B}_{2.0\%+1.5\%} &= \vec{A} \times \vec{X}_{2.0\%+1.5\%} = \\ &(0.00, 0.11, 0.40, 0.55) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \vec{B}_{2.5\%+2.0\%} &= \vec{A} \times \vec{X}_{2.5\%+2.0\%} = \\ &(0.08, 0.18, 0.33, 0.45) \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \vec{B}_{3.0\%+1.5\%} &= \vec{A} \times \vec{X}_{3.0\%+1.5\%} = \\ &(0.08, 0.23, 0.40, 0.40) \end{aligned} \quad (7)$$

### (5) 计算各配比的综合评价价值

$$W_{1.5\%+2.0\%} = \vec{B}_{1.5\%+2.0\%} \times \vec{Y}_{1.5\%+2.0\%} = 0.94 \quad (8)$$

同理可以求得  $W_{2.0\%+1.5\%}$ ,  $W_{2.5\%+2.0\%}$ ,  $W_{3.0\%+1.5\%}$  取值分别为1.42、1.20和1.01。根据模糊数学分析法原理,选择最大值作为最优掺比方案,得分次之的为次优方案,如此往下排列选择。由于  $W_{2.0\%+1.5\%} > W_{2.5\%+2.0\%} > W_{3.0\%+1.5\%} > W_{1.5\%+2.0\%}$ , 确定该吹填淤泥的最优配比为:2.0%水泥+1.5%氧化钙。

## 5 结论

为提高吹填淤泥土的固化效果、降低固化成本,以水泥和氧化钙作为双掺,通过设计合理的试验配比,借助击实、单轴压缩等方法分析了固结试样的力学性能,并依据模糊综合评价探讨了在最优含水率条件下的最优配合比方案。结论如下:

(1) 水泥和氧化钙采用同等比例进行掺入的工况下,固化后的试样最优含水率随着掺量增加而增加,最大干密度线性降低。这一规律说明当固化剂

掺入量超过某一含量后,反而降低固化土的干密度,一方面增加固化成本,同时影响固化效果。

(2) 不同固化变量试验中,固化土的抗压强度与单一水泥作为变量呈正相关,对于单氧化钙作为变量,样品的掺入量偏低时抗压强度呈现不稳定的波浪变化规律,说明在双掺固化过程中存在某一个最优配合比。

(3) 通过单轴与击实试验可以发现,双掺入固化与单一变量固化存在显著差别,双掺入固化土呈现出脆性破坏特征。采用水泥-氧化钙固化吹填淤泥土其应变与强度呈现负相关,但并未表现出常规水泥土的指数递减关系,其应变损伤范围为1.0%~3.0%,当应变超过2.0%后的固化试样强度通常小于400 kPa。

(4) 通过模糊综合评价方法,将掺入固化剂的成本、单轴抗压强度和击实性能作为评价因子,最后得到该工程吹填淤泥应用最优配合比为2.0%水泥+1.5%氧化钙。

### 参考文献:

### References:

- [1] ROBERT B R. Concentrated liquid stabilizers for railroad applications[C]//Roadbed Stabilization and Ballast Symposium Missouri St. Louis, St. Louis, MO, USA: 2000 (8/9):349-365.
- [2] SABOUNDJIAN S. Subbase treatment using EMC2 soil stabilizer-Final report 1997—2001[R]. Juneau, Alaska Dept of Transportation and Public Facilities, Research and Technology Transfer, 2002:1-26.
- [3] 杨智慧,李珊花.基于PFC<sup>2D</sup>的水泥土单轴压缩试验及微观数值模拟[J].中外公路,2023,43(1):189-193.  
YANG Zhihui, LI Shanhua. Uniaxial shear test and mesoscopic numerical simulation of cemental soil based on PFC<sup>2D</sup> method[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2023,43(1): 189-193.
- [4] 张同虎,孟令娣.城市湖泊环保疏浚淤泥固化试验研究[J].中国水运(下半月),2012,12(12): 264-266.  
ZHANG Tonghu, MENG Lingdi. Experimental study on solidification of environmental protection dredged sludge in urban lakes[J]. China Water Transport, 2012, 12(12): 264-266.
- [5] 李育林,梁鸿杰,梁军林,等.复合外加剂对水泥混凝土冬



- 季施工性能的影响研究[J]. 中外公路, 2023, 43(4): 284-291.
- LI Yulin, LIANG Hongjie, LIANG Junlin, et al. Study on effect of nanomodified additives on properties of concrete mixtures during winter season[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2023, 43(4): 284-291.
- [6] 范留军, 路晓明, 苗鹏. 软土区碎石桩鼓胀变形正交数值试验影响因素分析[J]. 中外公路, 2023, 43(1): 25-30.
- FAN Liujun, LU Xiaoming, MIAO Peng. Analysis on influence factors of swelling deformation of gravel pile in soft soil area based on orthogonal numerical test[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2023, 43(1): 25-30.
- [7] 郎瑞卿, 裴璐熹, 孙立强, 等. 新拌不同液限淤泥固化土流动性试验研究[J]. 岩土力学, 2023, 44(10): 2789-2797.
- LANG Ruiqing, PEI Luxi, SUN Liqiang, et al. Experimental study on the flowability of freshly mixed solidified muds with different liquid limits[J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, 44(10): 2789-2797.
- [8] 岳志才, 陈阳, 王起龙, 等. 寒冷地区结构物用C40砂岩碎石混凝土耐久性性能研究[J]. 中外公路, 2023, 43(5): 219-225.
- YUE Zhicai, CHEN Yang, WANG Qilong, et al. Research on durability of C40 sandstone gravel concrete in cold areas [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2023, 43(5): 219-225.
- [9] 李俊才, 赵泽三, 高国瑞. 水泥土的微结构特征及分析[J]. 成都理工大学学报, 2000, 27(4): 388-393.
- LI Juncai, ZHAO Zesan, GAO Guorui. Analysis and microstructure characters of cement-soil[J]. Journal of Chengdu University of Technology, 2000, 27(4): 388-393.
- [10] 杨爱武, 杜东菊, 卢力强. 天津吹填软土沉积特性及其微观结构研究[J]. 水文地质工程地质, 2010, 37(5): 83-87.
- YANG Aiwu, DU Dongju, LU Liqiang. Study on sediment characteristics and micro-structure of soft dredger soil of Tianjin[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2010, 37(5): 83-87.
- [11] 王景霞. 赤泥-粉煤灰协同水泥-生石灰固化铜离子污染高岭土的试验研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2021.
- WANG Jingxia. Experimental study on red mud-fly ash synergistic cement-quicklime solidification of copper ion contaminated Kaolin[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2021.
- [12] 吴越鹏, 王修山, 金胜赫, 等. 生石灰-石粉-WSS固化剂在钻渣废弃土筑路再生中的应用[J]. 工程地质学报, 2023, 31(2): 409-420.
- WU Yuepeng, WANG Xiushan, KIM Sunghyok, et al. Application of quicklime-limestone powder-wss soil stabilizer in road regeneration of drilling waste mud[J]. Journal of Engineering Geology, 2023, 31(2): 409-420.
- [13] 刘银芳, 胡椿华, 秦金龙, 等. 高强粉质黏土-水泥搅拌土固化剂配比研究[J]. 华东交通大学学报, 2023, 40(4): 33-39.
- LIU Yinfang, HU Chunhua, QIN Jinlong, et al. Study on curing agent ratio of high strength silty clay-cement mixed soil[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2023, 40(4): 33-39.
- [14] 贺佐跃, 李红中, 陈万里, 等. 水泥对珠三角地区淤泥抗剪强度参数的影响分析[J]. 中外公路, 2021, 41(1): 237-242.
- HE Zuoyue, LI Hongzhong, CHEN Wanli, et al. Influence cement on shear strength parameters of sludge in Pearl River Delta area[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2021, 41(1): 237-242.
- [15] 董博闻, 王修山, 沈森杰. 基于正交试验的复合土壤固化剂配合比设计研究[J]. 人民长江, 2021, 52(9): 193-197.
- DONG Bowen, WANG Xiushan, SHEN Senjie. Design of mixture ratio of composite soil solidification agent based on orthogonal test[J]. Yangtze River, 2021, 52(9): 193-197.
- [16] 李海龙, 刘科, 沈扬, 等. 水泥-生石灰固化吹填土路用特性试验研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2014, 12(2): 51-57.
- LI Hailong, LIU Ke, SHEN Yang, et al. Experimental research on road-used performance of dredger fill with cement-lime curing[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2014, 12(2): 51-57.
- [17] 冒小丹, 梁鑫, 刘功勋. 淤泥固化填筑路基试验研究[C]//中国地质学会. 第十一届全国工程地质大会论文集. 中交疏浚技术装备国家工程研究中心, 2020: 6.
- MAO Xiaodan, LIANG Xin, LIU Gongxun. Experimental study on silt solidification filling of roadbed [C]//Chinese Geological Society Proceedings of the 11th National Conference on Engineering Geology CCCC Dredging Technical Equipment National Engineering Research Center, June 2020.
- [18] 卫亚洲, 冀荣庆. 考虑砂率和骨胶比的透水混凝土配合比设计及其性能研究[J]. 中外公路, 2023, 43(4): 261-267.
- WEI Yazhou, JI Rongqing. Study on mix design and performance of permeable concrete considering sand ratio and aggregate to binder ratio[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2023, 43(4): 261-267.