

广州某淤泥地基固化改良试验及优化配比研究\*

张丽娟,何捷聪,陈逸,关裕彤

(广东工业大学 土木与交通工程学院,广州 510006)

**摘 要:**广州南沙港某油罐仓储区工程淤泥地基拟采用固化剂加固,为了找到各固化剂的最佳掺量,取该工程场地的典型淤泥,采用正交法设计了18组固化剂添加方案,通过室内试验研究了水泥、石灰、石膏、水玻璃和减水剂5种固化剂对淤泥无侧限抗压强度的影响,并根据模糊优选决策理论,利用成本等4项评判指标对其中满足强度要求的7组固化剂添加方案进行了优选。结果表明,5种固化剂中,水泥掺量对强度的影响最大,石膏掺量的影响最小。水泥、减水剂、水玻璃、石膏和石灰掺量分别为5%、0.5%、2%、4%和8%时的固化剂添加方案相对优属度0.885 3为最大,是综合最优方案。试验结果为该工程进行大面积地基加固处理提供了可靠的技术参数,采用该综合最优方案的现场大面积加固效果非常好。

**关键词:** 淤泥地基改良;固化剂;试验研究;模糊优选;最优方案

中图分类号:TU470      文献标识码:A      文章编号:1673-0836(2017)02-0344-04

Research on Mud Foundation Solidification Improvement Experiment and Optimal Additive Portion of A Project in Guangzhou

Zhang Lijuan, He Jiecong, Chen Yi, Guan Yutong

(School of Civil and Transportation Engineering, Guangdong university of Technology, Guangzhou 510006, P.R. China)

**Abstract:** Mud foundation of a petroleum storage facilities in Guangzhou Nansha port area will be improved by grouting of additives. In order to find the best additive portion, based on 18 groups of additive portion schemes, cement, lime, gypsum, sodium silicate and water-reducer are used as solidified agent to research the effect of additives to unconfined compression strength. Based on the fuzzy optimization theory, using cost etc. four criteria to optimize seven groups of additive portion schemes. Results show that among the five factors affecting strength, cement is the most one, gypsum is the last one. The maximum superior degree is 0.885 3 with the additive portion of cement, water-reducer, sodium silicate, gypsum and lime 5%、0.5%、2%、4% and 8% respectively. The results can provide reliable parameters for the entire project, ideal result was obtained for the whole area treated with the best additive portion.

**Keywords:** mud foundation improvement; additives; experimental research; optimal selection; best scheme

0 引言

广州南沙港位于珠江口伶仃洋喇叭湾顶,土质为第四纪河相和海相交错沉积软土,多为含水量丰富的淤泥、淤泥质粘土,平均厚度约为10 m,孔隙

比一般超过1.5,含水量一般都超过75%,具有承载力低、压缩性大、结构性强等特性<sup>[1,2]</sup>。软基处理加固技术成为该区域土建中关键的制约性技术问题。固化剂加固是目前软基处理中常用的一种方法,水泥、石膏、石灰、各类矿渣以及粉煤灰等无

\* 收稿日期:2016-08-12(修改稿)  
作者简介:张丽娟(1969-),女,辽宁辽阳人,博士,副教授,主要从事软土工程性质、软土地基处理等方面的教学和科研工作。E-mail:zhanglijuan1969@126.com  
基金项目:国家自然科学基金(51178122)

机化合物类的固化剂具有材料成本低、易于现场取材、性能稳定等优点,应用尤为广泛<sup>[3-4]</sup>,在其加固机理、固化土的物理力学性质和微观结构等方面也开展了很多研究工作<sup>[5-8]</sup>。目前,针对广州地区尤其是南沙港区淤泥固化的研究还很少,由于南沙港区淤泥不同的沉积环境造成其物质成分及含量,结构构造有明显的区域特性,固化加固时适宜的固化剂类型、掺量、处理效果等也和其他地区有很大差别,因此,有必要根据工程现场淤泥的特点,有针对性地选用合适的固化剂,开展淤泥改良的室内试验研究,利用优化理论找出固化淤泥的最优配比,作

为现场大面积加固施工时固化剂掺量调整、确定的依据。

1 试验材料和方案

1.1 固化剂和淤泥土样

根据现场淤泥的特点,本试验研究用的固化剂采用水泥、石灰、石膏、水玻璃和减水剂 5 种。试验采集的淤泥土样取自广州南沙港某油罐仓储区地基。根据室内试验测定结果,土样的物理力学指标如表 1 所示。

表 1 淤泥土样平均物理力学指标

Table 1 Average physical and mechanical parameters of mud soil sample

土样名称	含水量 $\omega$ / %	重度 $\rho$ / ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	孔隙比 $e$	比重 $G_s$	液限 $\omega_L$ / %	塑限 $\omega_P$ / %	黏聚力 $c$ / kPa	摩擦角 $\phi$ / ( $^\circ$ )
淤泥	74.8	1.61	2.087	2.71	58.9	31.8	4.8	6.5

1.2 正交试验方案

本文研究水泥、石灰、石膏、水玻璃和减水剂 5 种固化剂对淤泥加固效果的影响。为了初步确定各固化剂的固化效果和掺量范围,在正交试验前开展了各固化剂单掺试验,并根据单掺试验结果,确

定正交试验时每种固化剂的掺量水平如表 2 所示。每种固化剂设计 4 个掺量水平,即五因素四水平试验,共需 16 组试验组合,各固化剂的掺量按质量百分比计。

表 2 正交试验方案及各方案无侧限抗压强度结果

Table 2 Orthogonal experiment schemes and results of 7 d unconfined compression strength

试验编号	影响因素					7 d 无侧限抗压强度/kPa
	水泥掺量 A	减水剂掺量 B	水玻璃掺量 C	石膏掺量 D	石灰掺量 E	
1	1 (3%)	1 (0.5%)	1 (1.0%)	1 (1.5%)	1 (2%)	190
2	1	2 (0.8%)	2 (2%)	2 (3%)	2 (4%)	282
3	1	3 (1.2%)	3 (3%)	3 (4%)	3 (6%)	310
4	1	4 (1.5%)	4 (4%)	4 (5%)	4 (8%)	313
5	2 (5%)	1	2	3	4	391
6	2	2	1	4	3	321
7	2	3	4	1	2	375
8	2	4	3	2	1	238
9	3 (8%)	1	3	4	2	464
10	3	2	4	3	1	387
11	3	3	1	2	4	335
12	3	4	2	1	3	367
13	4 (10%)	1	4	2	3	540
14	4	2	3	1	4	578
15	4	3	2	4	1	304
16	4	4	1	3	2	330
R	164.25	84.25	109.75	28.75	124.5	

2 试样制备

将按配比充分搅拌的固化土分层装入到三瓣模并击实,制作成直径为 40 mm、高 80 mm 的试样,将三瓣模连同试样放在温度为 18 ℃,相对湿度为 50% 的恒温箱中养护 24 h 然后脱模,将脱模后的试样用塑料保鲜袋密封并编号记录后置于水槽中养护至龄期,养护温度控制在 20 ℃,相对湿度为 90%。

3 试验结果及固化剂配比优化研究

3.1 试验结果及分析

无侧限抗压强度对于了解土体的加固效果,确定添加剂的合理掺量范围具有指导意义<sup>[9]</sup>。按正交试验方案表 2 的方案进行试验,共 16 组,每组进行 3 次平行试验,所得的 7 天平均无侧限抗压强度结果列于表 2 的最后一列,并对试验结果进行处理,通过极差分析,找出各因素对无侧限抗压强度影响大小的主次顺序,分清主要因素和次要因素。表 2 中最后一行  $R$  表示 7 天无侧限抗压强度平均值的极差,用来衡量试验中各因素作用的大小,极差越大,说明该因素水平变化对强度所造成的影响越大,是越重要的因素,反之亦然。根据  $R$  的大小可以看出,影响固化淤泥无侧限抗压强度的 5 个因素的主次顺序是  $A-E-C-B-D$ ,即水泥掺量是最主要影响因素,石灰掺量次之,石膏掺量的影响最小。

3.2 固化土配比优化研究

除了强度外,淤泥固化还要考虑成本、固化土的渗透性等因素,因此,固化土最佳配比方案的选择是一个多因素多目标优化问题,可以利用模糊优选决策理论进行优选。模糊优选决策理论能够优

选的方案能综合考虑强度、成本等各方面因素的影响<sup>[10-11]</sup>,全面反映固化土的实际情况,对实际工程的决策具有指导意义。

3.2.1 模糊优选决策基本模型<sup>[12]</sup>

利用  $m$  个评判指标对  $n$  种方案进行评价,根据方案  $j$  ( $j=1,2,\cdots,n$ ) 加权距优欧式距离与加权距劣欧式距离平方之和为最小的原则得到方案  $j$  的相对优属度为:

$$u_j = \frac{1}{1 + \frac{\sum_{i=1}^m [w_i(a_i - r_{ij})]^2}{\sum_{i=1}^m [w_i(r_{ij} - b)_i]^2}} = \frac{1}{1 + \frac{\sum_{i=1}^m [w_i(1 - r_{ij})]^2}{\sum_{i=1}^m (w_i r_{ij})^2}}$$

式中: $w_i$  表示第  $i$  ( $i=1,2,\cdots,m$ ) 个评判指标的权重; $r_{ij}$  为方案  $j$  的第  $i$  个评判指标归一化后的指标特征值。

3.2.2 固化配比方案模糊优选

根据表 2 的试验结果可以看出,有 7 组配比固化淤泥的 7 天无侧限抗压强度大于 350 kPa,可以满足加固后场地地基强度的要求。取这 7 组配比方案为备选方案,利用 7 天无侧限抗压强度、渗透系数、含水量的变化和成本为评判指标,对 7 组方案进行优化,各个方案指标具体取值如表 3。其中渗透系数利用自制的变水头渗透仪对养护 14 天后的试样测得,固化成本按各添加剂的市场价格计算得到。模糊优选中评判指标权重是一个非常重要的参数,直接影响到优化结果,本文中评价指标权重的选取是在结合工程实情况,征求多位专家的意见同时听取工程单位建议的基础上,经过反复比较后选定的。

表 3 固化配比方案目标特征值

Table 3 Eigenvalues of additive portion schemes

	权重	方案 1 $A_2B_1C_2D_3E_4$	方案 2 $A_2B_3C_4D_1E_2$	方案 3 $A_3B_1C_3D_4E_2$	方案 4 $A_2B_2C_4D_3E_1$	方案 5 $A_3B_4C_2D_1E_3$	方案 6 $A_4B_1C_4D_2E_3$	方案 7 $A_4B_2C_3D_1E_4$
强度/kPa	0.20	391	375	464	387	367	540	578
渗透系数 ( $10^{-6}\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ )	0.20	1.089 5	1.332 6	1.113 0	1.257 8	1.341 2	0.933 4	0.879 5
含水量变/%	0.05	-5.4	-4.8	-5.8	-5.5	-5.1	-6.2	-6.7
固化土成本(元/t)	0.55	118	121	125	140	162.5	146	153.5

根据表 3 得到目标特征值矩阵为:

$$R_{7 \times 4} = \begin{bmatrix} 391 & 375 & 464 & 387 & 367 & 540 & 578 \\ 1.089\ 5 & 1.332\ 6 & 1.113\ 0 & 1.257\ 8 & 1.341\ 2 & 0.933\ 4 & 0.879\ 5 \\ -5.4 & -4.8 & -5.8 & -5.5 & -5.1 & -6.2 & -6.7 \\ 118 & 121 & 125 & 140 & 162.5 & 146 & 153.5 \end{bmatrix}$$

其中强度、含水量变化属于越大越优目标,成本、渗透系数属于越小越优目标,对目标特征值进行归一化处理得到目标相对优属度矩阵:

$$X_{7 \times 4} = \begin{bmatrix} 0.114 & 0.038 & 0.460 & 0.095 & 0 & 0.820 & 1 \\ 0.545 & 0.019 & 0.494 & 0.181 & 0 & 0.883 & 1 \\ 0.316 & 0 & 0.526 & 0.368 & 0.158 & 0.734 & 1 \\ 1 & 0.933 & 0.823 & 0.506 & 0 & 0.371 & 0.202 \end{bmatrix}$$

取目标权向量为  $w = [0.2 \quad 0.2 \quad 0.05 \quad 0.55]^T$ , 计算得到 7 种方案相对优属度向量为:

$$u_j = [0.885\ 3 \quad 0.768\ 4 \quad 0.875\ 1 \quad 0.371\ 6 \quad 0.000\ 2 \quad 0.453\ 7 \quad 0.329\ 9]$$

从计算结果可以看出,方案 1( $A_2B_1C_2D_3E_4$ )的相对优属度 0.885 3 为最大,即水泥、减水剂、水玻璃、石膏和石灰掺量分别为 5%、0.5%、2%、4%和 8%时的固化剂添加方案为综合最优方案。水泥、减水剂、水玻璃、石膏和石灰掺量分别为 8%、0.5%、3%、5%和 4%的方案 3 相对优属度为 0.875 1,为综合次优方案。本文通过模糊优选得到的固化剂最佳配比方案被工程大面积加固所采用,加固效果非常好。

4 结 语

针对广州南沙港某油罐仓储区的典型淤泥,以水泥、石灰、石膏、水玻璃和减水剂为固化剂,通过室内试验研究了 18 组不同配比的固化剂对淤泥无侧限抗压强度的影响,并根据模糊优选决策理论,利用成本等 4 项评判指标对其中满足强度要求的 7 组固化剂添加方案进行了优选。从中我们可以看出:影响固化土无侧限抗压强度的 5 种固化剂中,水泥掺量的影响大,石灰掺量次之,石膏掺量的影响最小。水泥、减水剂、水玻璃、石膏和石灰掺量分别为 5%、0.5%、2%、4%和 8%时的固化剂添加方案相对优属度 0.885 3 为最大,是综合最优方案。试验结果为该工程进行大面积地基加固处理提供了可靠的技术参数,也对珠三角地区大量类似淤泥的改良有一定的参考意义。

参考文献(References)

[1] 刘勇健,李彰明,梁仕华,等. 软土工程性质与微观结构关系的神经网络模型[J]. 地下空间与工程学报, 2013,9(4): 777-782. (Liu Yongjian, Li Zhangming, Liang Shihua, et al. Neural network model on the relationship between engineering properties and microstructure of soft soils [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2013,9(4): 777-782. (in Chinese))

[2] 张丽娟,李彰明,韩江. 动静力排水固结法在广州某淤泥质地基处理工程中的应用[J]. 岩土力学, 2009, 30(2): 567-571. (Zhang Lijuan, Li Zhangming, Han Jiang. The application of dynamic-static consolidation method on a silt ground disposal project of Guangzhou [J]. Rocks and Soil Mechanics, 2009, 30(2): 567-571. (in Chinese))

[3] 李琴,孙可伟,徐彬,等. 土壤固化剂固化机理研究进展及应用[J]. 材料导报, 2011, 25(9): 64-67. (Li Qin, Sun Kewei, Xu Bin, et al. Progress and application on curing mechanism of soil stabilizer [J]. Materials Review, 2011, 25(9): 64-67. (in Chinese))

[4] 李晨,孙川,刘松玉. 粒化高炉矿渣微粉对固化土特性影响研究[J]. 地下空间与工程学报, 2013, 9(增2): 1827-1832. (Li Chen, Sun Chuan, Liu Songyu. The effects of GGBS on the engineering properties of stabilized soil [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2013, 9(Supp.2): 1827-1832. (in Chinese))

[5] 赵含梅,赵仲辉,胡孝彭,等. 固化淤泥持水特性试验[J]. 水利水电科技进展, 2014, 34(1): 57-60. (Zhao Hanmei, Zhao Zhonghui, Hu Xiaopeng, et al. Experimental study on water retention characteristics of solidified dredged [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2014, 34(1): 57-60. (in Chinese))

[6] 朱廷忠,郑刚,李志国,等. 天津市浅部典型土层水泥土力学性能试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2005, 1(5): 728-732. (Zhu Tingzhong, Zhen Gang, Li Zhiguo, et al. Experimental study on mechanical behavior of cemented soil of shallow soil strata in Tianjin [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2005, 1(5): 728-732. (in Chinese))