

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme20230831001

水下抗分散水泥土正交试验及配比优化方法研究*

黄挺^{1,2}, 郑杰^{1,2}, 戴国亮³, 谭慧明^{1,2}

(1. 河海大学海岸灾害及防护教育部重点实验室, 江苏南京 210098; 2. 河海大学港口海岸与近海工程学院, 江苏南京 210098; 3. 东南大学土木工程学院, 江苏南京 210096)

摘要: 水流经过桩基时会形成漩涡侵蚀床面, 影响桩基及上部结构的稳定性, 冲刷治理是工程界关注的热点问题。为促进固化土技术在桩基冲刷修复中的应用, 设计开展了抗分散水泥固化土系列正交试验。针对高岭土和淤泥土, 选用PAM、EVA、黄原胶、HPMC四种抗分散剂, 采用平均效果分析和极差分析, 研究了抗分散剂种类、抗分散剂掺量、含水量和水泥掺量对流动度、浊度、7 d和28 d无侧限抗压强度的影响。结果表明: 对于高岭土, 抗分散剂掺量从0.25%增大到1%, 水泥土流动度减小20%, 浊度减小25%, 抗分散剂掺量对流动性和抗分散性的影响显著。对于淤泥土, 对抗分散性影响显著的仍是抗分散剂掺量, 而对流动性的影响显著的则是含水量, 含水量从1.4倍液限增大到2.0倍液限, 水泥土流动度增大45%。基于综合平衡法、矩阵分析法和多元线性回归模型, 提出了一种抗分散水泥土配比设计方法, 研究得到了高岭土和淤泥土抗分散水泥固化土的推荐配比, 其在泥沙起动实验中的抗冲刷特性明显优于原始土样。

关键词: 正交试验; 抗分散水泥土; 极差分析; 综合平衡法; 矩阵分析法; 回归分析

中图分类号: TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2024)03-0678-11

Research on Orthogonal Experiments and Optimization of Mixing Ratios for Underwater Anti-Dispersion Cement-Stabilized Soil

HUANG Ting^{1,2}, ZHENG Jie^{1,2}, DAI Guoliang³, TAN Huiming^{1,2}

(1. Key Laboratory of Coastal Disaster and Defence of Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: Water flow around pile foundations can create vortices that erode the bed surface, compromising the stability of both pile foundations and superstructure. Therefore, addressing scour management has always been a hot topic in engineering. To advance the application of cement-stabilized soil technology in scour repair for pile foundations, orthogonal experiments were designed and carried out on dispersion-resistant cement-stabilized soils. Four types of anti-dispersants, PAM, EVA, xanthan gum, and HPMC, were selected for kaolinite and silt soils. The effects of anti-dispersants type, anti-dispersant dosage, water content, and cement dosage on fluidity, turbidity, and unconfined compressive strength at 7 and 28 days were studied using average effect and range analysis. The results showed that for kaolinite, increasing the anti-dispersants content from 0.25 % to 1 % decreased the

* 收稿日期: 2023-08-31; 修回日期: 2024-04-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(52078128)资助

作者简介: 黄挺(1983—), 男, 副研究员, 博士。主要从事地基基础、海洋岩土等方面的研究。E-mail: huangting@hhu.edu.cn

fluidity of the cement-stabilized soil by 20% and turbidity by 25%, demonstrating a significant impact on both fluidity and anti-dispersion properties. For silt soils, the anti-dispersant dosage significantly influenced anti-dispersion properties, while water content was the main factor affecting fluidity. When the water content increased from 1.4 w_L to 2.0 w_L , the fluidity of cement-stabilized soil increased by 45%. Based on the comprehensive balance method, matrix analysis method, and multiple regression linear model, a method for designing the mixing proportions of anti-dispersion cement-stabilized soil was proposed. The recommended ratio of kaolinite and silt soils showed significantly better anti-scour characteristics in the sediment initiation experiments compared to the original soil sample.

Keywords: orthogonal experiment; anti-dispersion cemented-stabilized soil; range analysis; comprehensive balance method; matrix analysis; regression analysis

0 引言

水下桩基的冲刷治理问题一直是研究热点之一^[1]。桩周冲刷改变了桩基埋深,影响工程安全^[2-3]。目前常用的抛石和砂被等冲刷治理方案存在整体性差、易流失的弊端,具有一定水稳性、抗冲刷性和高流动性的固化土技术成为近来备受关注的新型冲刷修复方法之一^[4]。

关于固化土桩基冲刷防护国内外许多学者进行了相关研究^[5-6]。丁健等^[7]针对某淤泥底质海上风电场,设计了原位淤泥固化防护方案。沈晓雷等^[8]建立了固化土加固海上风电桩基础的有限元计算模型,研究发现固化土可使桩基的水平承载力提高 147%。J. Wang 等^[9]研究发现无侧限抗压强度为 300 kPa 的土壤样品在固化后可以抵抗 3.14 m/s 以上的水流侵蚀。上述研究证明了固化土在冲刷防护方面的优越性,但是如何进一步提高水泥固化土水下抗分散性能使其适用于冲刷修复,仍未形成统一共识。

使用添加剂是提高灌注材料水下工作性能的重要途径。K. Khayat^[10]采用不同类型的抗分散剂制备水下抗分散混凝土,研究表明微生物多糖和纤维素衍生物可显著提高混凝土的抗水稀释性能。A. Abbas 等^[11]研究不同添加剂对抗分散混凝土的效用,发现非离子纤维素醚和减水剂的组合,可以获得较好抗分散性能。逢鲁峰等^[12]通过单因素试验法研究了聚糖类高分子絮凝剂对水下灌浆料抗分散等性能的影响,发现絮凝剂掺量不超过 1.5% 时提升较好。高礼雄等^[13]通过 pH 值、浊度测试和 SEM 微观分析研究外加剂对水下抗分散水泥基砂

浆的提升效果,发现再生乳胶增强了砂浆的抗分散能力。上述研究多针对用于水下混凝土性能提升的添加剂,如何选择适用于水泥固化土的抗分散剂还需进一步研究。

综上所述,为促进水下抗分散水泥固化土技术在水下桩基冲刷修复中的应用,针对水泥土关键工程性能,开展材料配比研究。在动水条件应用之前,本文先通过浊度指标评价水泥土在静水条件下的抗分散性;通过无侧限抗压强度指标评价水泥土固化后的防冲刷效果^[7];通过流动度指标评价水泥土修复冲刷坑时泵送施工的可行性^[14]。选择抗分散剂种类、抗分散剂掺量、含水量和水泥掺量四个影响因素,对流动度、浊度、7 d 和 28 d 无侧限抗压强度四个指标,进行四因素四水平的正交试验,研究多指标水泥土配比优化方法,为工程应用提供参考。

1 试验概况

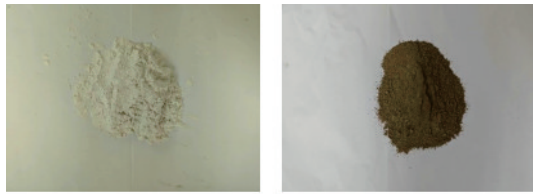
1.1 试验材料

本试验原料土分别采用高岭土和河相淤泥质黏土,其基本物理性质和外观分别见表 1 和图 1。其中高岭土为商业化的纯质土,可避免杂质影响,研磨粒径为 23 μm ,具有良好可塑性^[15];淤泥土来自于

表 1 土的物理力学指标

Table 1 Physical and mechanical properties of soils

土的类型	天然含水量/%	比重	塑限/%	液限/%	塑性指数/%
高岭土	—	2.63	23.8	49.0	25.2
淤泥土	41.7	2.7	22.9	38.4	15.5



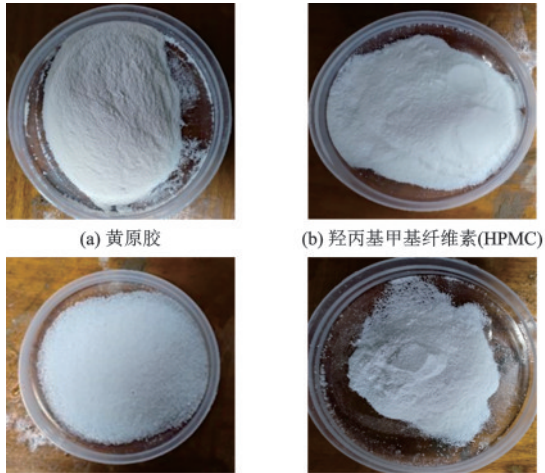
(a) 高岭土 (b) 淤泥土

图1 试验土样

Fig.1 Experimental soil samples

南京市浦口区江浦街道的施工场地区域,为典型的工程渣土。本试验选用海螺牌普通硅酸盐水泥,水泥标号为P.O 42.5。

本试验从三类水溶性聚合物中挑选四种常用的抗分散剂:天然聚合物有通过氢键吸附水分子的黄原胶;半合成聚合物有通过长链结构吸附细小颗粒的羟丙基甲基纤维素(HPMC);合成聚合物有吸附土颗粒和水泥颗粒达到絮凝作用的聚丙烯酰胺(PAM),和吸附自由水达到絮凝作用^[16]的乙烯-醋酸乙烯共聚物(EVA),其外观如图2所示。



(a) 黄原胶 (b) 羟丙基甲基纤维素(HPMC)

(c) 聚丙烯酰胺(PAM) (d) 乙烯-醋酸乙烯共聚物(EVA)

图2 抗分散剂

Fig.2 Anti-dispersants

1.2 试验方法

1.2.1 无侧限抗压强度试验

根据《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》^[17](JTG E51—2009),无侧限抗压强度试验采用SHT4305微机控制伺服万能试验机,见图3。试件采用尺寸为 $\Phi 50\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 的圆柱体,每组制备3个试件,共192个。



图3 万能试验机

Fig.3 Universal testing machine

1.2.2 流动性试验

根据《地面用水泥基自流平砂浆》^[18](JCT1023—2007)规范开展水泥土的流动性试验。试模采用内径 $(30 \pm 0.1)\text{ mm}$ 、高 $(50 \pm 0.1)\text{ mm}$ 的金属空心圆柱体。测试板采用面积大于 $300\text{ mm} \times 300\text{ mm}$ 的平面玻璃板,如图4所示。



图4 流动性试模和测试板

Fig.4 Fluidity test mold and testing plate

1.2.3 抗分散性试验

根据《水下不分散混凝土试验规程》^[19](DL/T 5117—2021)开展抗分散性试验,采用便携式浊度仪SGZ—200B,如图5所示。



图5 浊度仪

Fig.5 Turbidimeter

1.3 试验设计

根据正交试验设计,制定了抗分散水泥土试验组次,见表2。考虑水泥土的所有组成,试验涉及4个影响因素:A-抗分散剂种类;B-抗分散剂掺量;C-含水量;D-水泥掺量,每个影响因素分4个水平。

表2 L16(4⁴)正交试验设计

Table 2 Orthogonal test design table of L16(4⁴)

因素水平	A	B/%	C	D/%
水平1	PAM	0.25	1.4 w_L	8
水平2	EVA	0.5	1.6 w_L	10
水平3	黄原胶	0.75	1.8 w_L	12
水平4	HPMC	1	2 w_L	14

注:添加剂掺量和水泥掺量均为与干土的质量比, w_L 为原料土的液限

2 试验结果分析与讨论

根据正交试验设计方案,高岭土和淤泥土水泥土各16组试验结果见表3。基于试验结果,开展各因素的平均效果分析和极差分析^[20],以下分别讨论各因素对流动性、抗分散性和强度的影响规律和影响敏感性大小。

2.1 流动性

对表3中高岭土和淤泥土水泥土流动性试验结果进行平均效果分析,即正交试验组合表中某一因素在某个相同水平的多组试验所对应的流动度取平均值。各因素对流动度的平均效果分析结果以

及影响规律如图6所示。

由图6(a)可知,PAM对水泥土流动度削弱作用最大,这是因为PAM在土颗粒之间会形成纵横交错的桥架,将其组合为稳定的网状絮团结构^[21],导致拌合物的流动性显著降低。由图6(b)可知,抗分散剂掺量从0.25%增加到1%,高岭土和淤泥土制成的水泥土流动度分别减少了20.0%和26.7%。抗分散剂掺量增加会产生流动度下降的负面影响。由图6(c)和(d)可知,水泥土的流动度随含水量的增加而增加,而水泥掺量对流动度的影响不明显。

对表3中高岭土和淤泥土水泥土流动性试验结果进行极差分析,获得了某一因素各个水平的最大与最小平均效果值的差值R。R值反映因素水平变化时关于流动度的敏感性,分析结果如图7所示。

由图7可知,含水量对高岭土水泥土的流动性影响不显著,敏感性低,而对淤泥土水泥土流动性的影响显著,敏感性高。因为高岭土为研磨商品土,平均粒径为23 μm ^[22],而淤泥土平均粒径为10 μm 。相同质量下,较大的高岭土颗粒具有较小的比表面积,与水结合能力相对较弱^[23],相反淤泥土更易与水结合。相对较少的颗粒间自由水令土体内部黏结力的影响增大,从而显著影响流动性。

表3 正交试验指标结果统计

Table 3 Statistical table of orthogonal test results

试验组次	因素与水平	浊度/NTU		流动度/mm		7 d无侧限抗压强度/kPa		28 d无侧限抗压强度/kPa	
		高岭土	淤泥土	高岭土	淤泥土	高岭土	淤泥土	高岭土	淤泥土
1	A1B1C1D1	114.9	55.2	76.5	39	140.75	260.11	362.8	292.48
2	A1B2C2D2	94.83	48.71	74	43.5	163.84	262.90	327.86	294.95
3	A1B3C3D3	77.2	42.7	66.5	41.5	128.66	276.21	199.43	340.28
4	A1B4C4D4	97.56	56.8	62	38	212.51	274.69	288.57	346.52
5	A2B1C2D3	131	59.22	89	47.5	136.98	385.02	160.39	440.02
6	A2B2C1D4	111.31	52.83	75	39	293.09	731.21	467.84	909.89
7	A2B3C4D1	114.6	53.68	87	56.5	369.18	106.73	613.33	125.39
8	A2B4C3D2	103.2	49.72	75	46.5	308.75	231.36	435.81	247.88
9	A3B1C3D4	141.25	54.74	92	57.5	220.06	354.56	270.11	370.68
10	A3B2C4D3	108.37	59.83	101.5	54	200.25	195.73	281.52	217.06
11	A3B1C3D4	106.64	41.21	74	36	202.96	339.20	267.58	366.81
12	A3B4C2D1	74.98	40.85	80.5	35.5	146.04	154.92	161.49	164.86
13	A4B1C4D2	90.67	58.32	98	65.5	162.71	156.75	496.23	209.84
14	A4B2C3D1	93.5	51.62	89.5	42	126.22	118.86	211.51	125.39
15	A4B3C2D4	91.73	40.78	73	37	346.75	569.85	587.01	626.92
16	A4B4C1D3	82.43	38.36	67	33.5	429.61	308.99	666.08	410.38

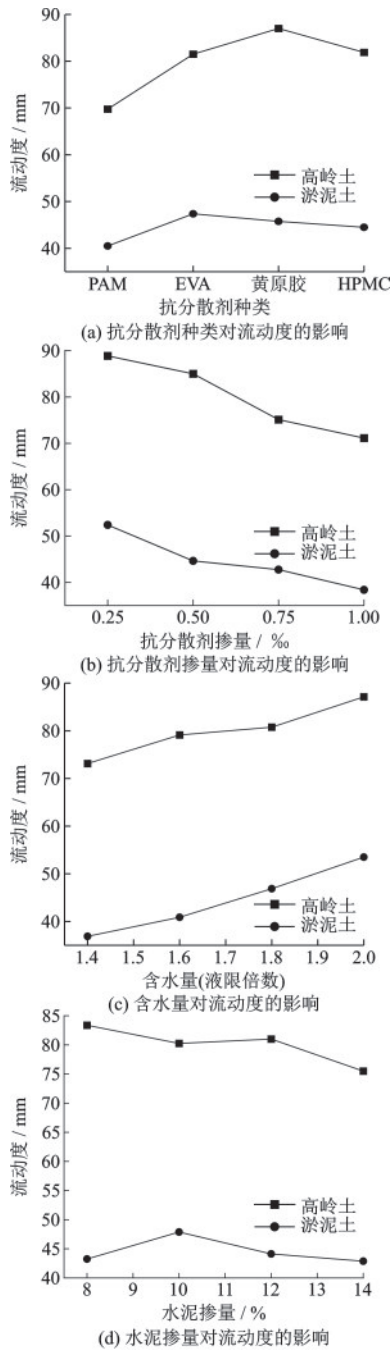


图6 各因素对流动度的影响规律

Fig.6 Influence patterns of each factor on fluidity

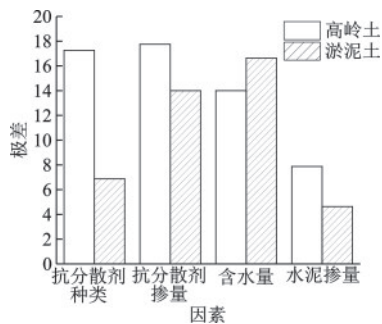


图7 流动度极差分析

Fig.7 Range analysis of fluidity

2.2 抗分散性

对表3中两种水泥土抗分散性试验结果进行平均效果分析和极差分析,各因素对浊度的平均效果分析结果以及影响规律如图8所示,浊度的极差分析结果如图9所示。

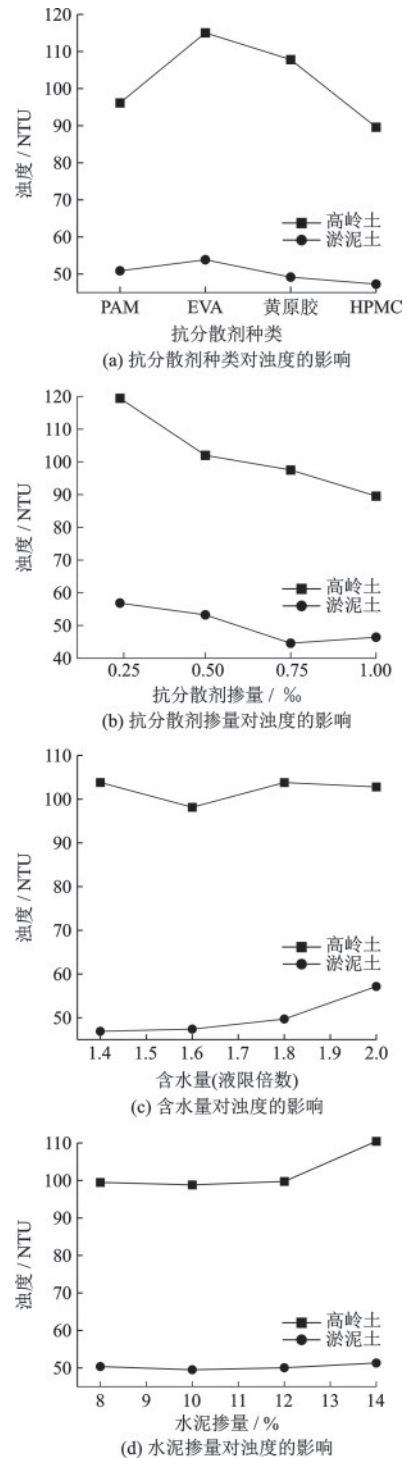


图8 各因素对浊度的影响规律

Fig.8 Influence patterns of various factors on turbidity

由图8(a)可知,选择HPMC抗分散剂的水泥土悬浊液浊度最低,抗分散性能最好,而EVA的抗分散性能最差。HPMC属于纤维素类聚合物^[24],其长链结构可以吸附水泥颗粒和细小土颗粒;而EVA是一种具有亲水性的聚合物,可增加水的黏度^[25]。相较而言,作用于固体颗粒的抗分散剂效果较好。由图8(b)可知,抗分散剂掺量从0.25‰增加到1‰,高岭土和淤泥土水泥土浊度分别减少了25.0%和18.4%,水泥土抗分散性显著提高,抗分散性提高效果如图10所示。由图8(c)、(d)可知,淤泥土水泥土的抗分散性随含水量的增加而降低,高岭土水泥土的抗分散性随水泥掺量的增加而提高。

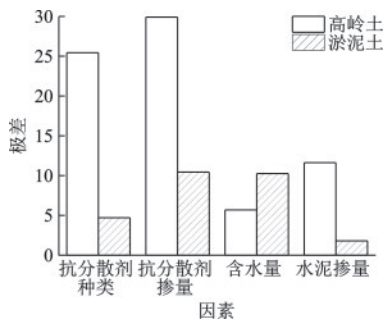


图9 浊度极差分析

Fig.9 Range analysis of turbidity

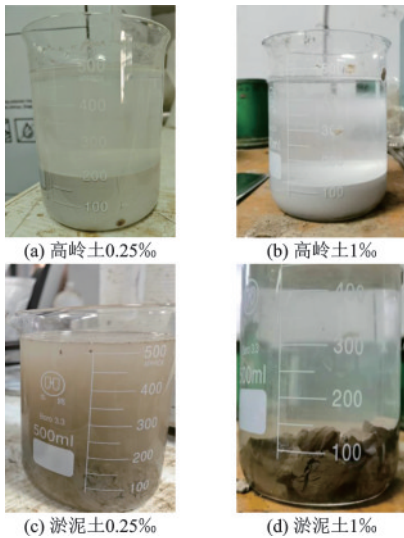


图10 不同抗分散剂掺量水泥土悬浊液浊度对比

Fig.10 Comparison of turbidity of cement-stabilized soil suspensions with different anti-dispersant dosages

由图9可知,抗分散剂掺量对水泥土浊度的影响最显著,敏感性高,说明抗分散剂可显著提高水泥土抗分散性。抗分散剂种类对高岭土水泥土浊度的影响较显著,但对淤泥土水泥土不显著。含水量对淤泥土水泥土的浊度影响显著,较高含水量导致颗粒之间的黏结力下降,故抗分散性显著下降。

2.3 无侧限抗压强度

对表3中两种水泥土的7 d、28 d无侧限抗压强度试验结果进行平均效果分析和极差分析,无侧限抗压强度的平均效果分析结果以及影响规律如图11所示,极差分析结果如图12所示。

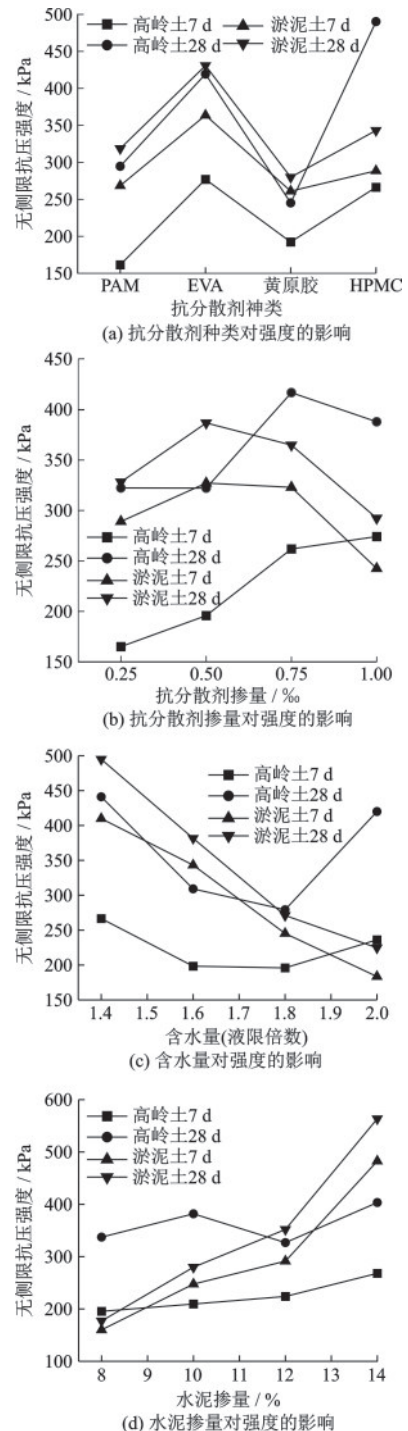


图11 各因素对无侧限抗压强度的影响规律

Fig.11 Influence patterns of various factors on unconfined compressive strength

由图 11 可知,高岭土水泥土 28 d 强度对比 7 d 强度平均增长了 64.7%,相比而言,淤泥土水泥土强度平均增长较慢,仅为 15.6%。由图 11(a)可知,EVA 和 HPMC 可显著提高水泥土强度。由图 11(c)、(d)可知,淤泥土水泥土在含水量从 1.4 倍液限到 2.0 倍液限时,其 7 d 和 28 d 无侧限抗压强度下降了 55.2% 和 54.6%;水泥掺量从 8% 到 14%,其 7 d 和 28 d 强度增加了 201.3% 和 218.3%。含水量越少,水泥掺量越多,淤泥土水泥土的强度越大。

由图 12 可知,对于高岭土水泥土,7 d 强度的含水量敏感性最小,28 d 时含水量的敏感性增至第二,抗分散剂种类的影响升至第一。说明高含水量减弱了土颗粒间水化反应随时间的增长,部分抗分散剂对水化反应存在明显抑制作用^[26]。由于淤泥土水泥土强度增长率较低,7 d 强度下各因素敏感性关系与 28 d 基本一致:水泥掺量和含水量敏感性高,添加剂掺量和种类的敏感性较低,表明相同因素对不同原料土制成的水泥土的影响显著不同,在工程应用中应开展针对性的配比研究。

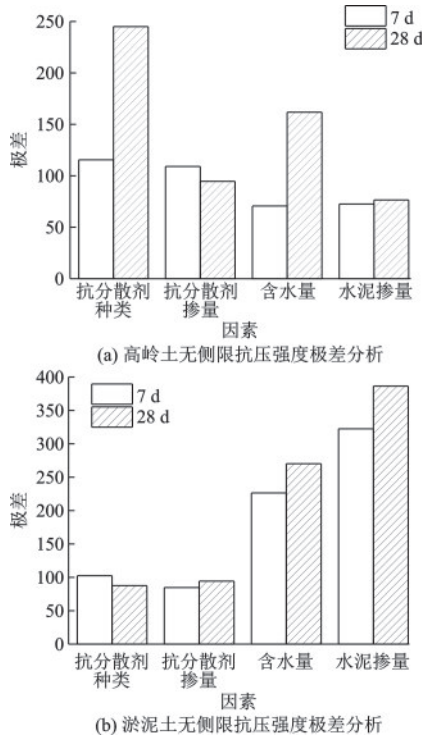


图 12 无侧限抗压强度极差分析
Fig.12 Range analysis of unconfined compressive strength

3 多指标配比优化方法和优化效果预测

当开展水泥土配比优化时,抗分散剂掺量对水

泥土的抗分散性和流动性的影响规律相反,较难直接得到兼顾两种指标的配比。以下将通过对比综合平衡法^[27]、矩阵分析法^[28]找出各自最优配比,同时建立多元线性回归模型^[29]对流动度、浊度、7 d 无侧限抗压强度进行预测并补充试验验证,进而形成优化配比。

3.1 综合平衡法

综合平衡法是通过综合对比试验结果,主观进行判断的优选方法^[30],以高岭土为例进行综合平衡法分析。例如抗分散剂掺量如取 0.25% 时,水泥土的抗分散性太差(浊度为 119.46 NTU);抗分散剂掺量如取 1%,水泥土的流动性太差(流动度为 71.125 mm)。因此抗分散剂掺量折中选择 0.625%,兼顾流动性、抗分散性,其他因素考虑方法同上。根据综合平衡法,选择高岭土水泥土优化配比:抗分散剂种类 HPMC,抗分散剂掺量 0.625%,含水量 2 倍液限,水泥掺量 12%。

同理,淤泥土水泥土优化配比:抗分散剂种类 EVA,抗分散剂掺量 0.75%,含水量 1.7 倍液限,水泥掺量 11%。

3.2 矩阵分析法

为解决多指标正交试验中最优方案的问题,可利用矩阵分析法对多指标正交试验结果进行优化。以高岭土为例,根据试验结果建立一个三层结构模型,第一层为试验考察指标层,第二层为因素层,第三层为水平层。

$$K_{ij} = k_{ij} \quad (1)$$

$$K_{ij} = 1/k_{ij} \quad (2)$$

式中, k_{ij} 为因素 A_i 第 j 个水平上的试验指标平均值; K_{ij} 为修正指标值,若考察指标(流动度)是越大越好,则按(1)式修正,反之则按(2)式修正。 K_{ij} 构成流动度的试验考察指标层矩阵 M_1 。

$$T_1 = 1 / \sum_{j=1}^m K_{ij} \quad (3)$$

式中, T_1 为流动度的因素层矩阵。

$$S_1 = s_i / \sum_{i=1}^l s_i \quad (4)$$

式中, s_i 为正交试验中因素 A_i 的极差; S_1 为流动度的水平层矩阵:

$$\omega_1 = M_1 T_1 S_1 \quad (5)$$

式中, ω_1 为流动度的权矩阵。

$$\omega = \frac{\omega_1 + \omega_2 + \omega_3}{3} \quad (6)$$

式中, ω 为 3 个指标的值的权矩阵的平均值; ω_2 为浊度的权矩阵; ω_3 为 7 d 无侧限抗压强度的权矩阵。

计算过程为:

$$M_1 = \begin{bmatrix} 69.7 & 0 & 0 & 0 \\ 81.5 & 0 & 0 & 0 \\ 87 & 0 & 0 & 0 \\ 81.8 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 88.8 & 0 & 0 \\ 0 & 85 & 0 & 0 \\ 0 & 75.1 & 0 & 0 \\ 0 & 71.1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 73.1 & 0 \\ 0 & 0 & 79.1 & 0 \\ 0 & 0 & 80.7 & 0 \\ 0 & 0 & 87.1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 83.3 \\ 0 & 0 & 0 & 80.2 \\ 0 & 0 & 0 & 81 \\ 0 & 0 & 0 & 75.5 \end{bmatrix}$$

$$T_1 = \begin{bmatrix} 1/320.1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/320.1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/320.1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/320.1 \end{bmatrix}$$

$$S_1 = \begin{bmatrix} 17.25/56.875 \\ 17.75/56.875 \\ 14/56.875 \\ 7.875/56.875 \end{bmatrix}$$

$$\omega_1 = \begin{bmatrix} 0.066 \\ 0.077 \\ 0.082 \\ 0.078 \\ 0.086 \\ 0.083 \\ 0.073 \\ 0.069 \\ 0.056 \\ 0.061 \\ 0.062 \\ 0.067 \\ 0.036 \\ 0.035 \\ 0.035 \\ 0.033 \end{bmatrix}$$

$$\omega_2 = \begin{bmatrix} 0.092 \\ 0.077 \\ 0.082 \\ 0.099 \\ 0.087 \\ 0.102 \\ 0.107 \\ 0.116 \\ 0.019 \\ 0.020 \\ 0.019 \\ 0.019 \\ 0.041 \\ 0.041 \\ 0.041 \\ 0.037 \end{bmatrix}$$

$$\omega_3 = \begin{bmatrix} 0.057 \\ 0.097 \\ 0.067 \\ 0.093 \\ 0.055 \\ 0.065 \\ 0.087 \\ 0.091 \\ 0.057 \\ 0.042 \\ 0.042 \\ 0.050 \\ 0.043 \\ 0.046 \\ 0.049 \\ 0.059 \end{bmatrix}$$

$$\omega = \begin{bmatrix} 0.072 \\ 0.084 \\ 0.077 \\ 0.090 \\ 0.076 \\ 0.083 \\ 0.089 \\ 0.092 \\ 0.044 \\ 0.041 \\ 0.041 \\ 0.045 \\ 0.04 \\ 0.041 \\ 0.042 \\ 0.043 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ A_4 \\ B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \\ C_1 \\ C_2 \\ C_3 \\ C_4 \\ D_1 \\ D_2 \\ D_3 \\ D_4 \end{bmatrix}$$

X_i 为因素 X (A-抗分散剂种类、B-抗分散剂掺量、C-含水量和 D-水泥掺量) 的水平 i (1、2、3、4) 对总指标值的影响权重值。由以上计算可得出四个因素中各自权重最大的水平为 A_4 、 B_4 、 C_4 、 D_4 , 即高岭土水泥土的流动度、浊度、7 d 无侧限抗压强度都较好的一组配比: 抗分散剂种类 HPMC, 抗分散剂掺量 1%, 含水量 2 倍液限, 水泥掺量 14%。

同理, 淤泥土水泥土优化配比: 抗分散剂种类 EVA, 抗分散剂掺量 0.75%, 含水量 1.8 倍液限, 水泥掺量 14%。

3.3 多元线性回归模型

基于正交试验结果, 采用多元线性回归模型对水泥土的流动度、浊度、7 d 无侧限抗压强度进行分析, 不同影响因素下的回归预测公式:

$$y = a + b_i \sum x_i \quad (7)$$

高岭土水泥土流动度预测式:

$$y = 60.84 + 4.19x_1 - 25.250x_2 + 21.81x_3 - 114.38x_4 \quad (8)$$

式中, x_1 表示抗分散剂种类, 取数字 1、2、3、4 代表 PAM、EVA、黄原胶和 HPMC; x_2 表示抗分散剂掺量; x_3 表示含水量; x_4 表示水泥掺量。

高岭土悬浊液浊度预测式为:

$$y = 111.59 - 2.63x_1 - 37.679x_2 + 1.3x_3 + 169.09x_4 \quad (9)$$

高岭土水泥土 7d 无侧限抗压强度预测式为:

$$y = 20.59 + 23x_1 + 157.339.9x_2 - 46.9x_3 + 1.159.87x_4 \quad (10)$$

同理,淤泥土的流动性、浊度、强度预测式分别为式(11)~(13)。

$$y = 8.09 + 1.04x_1 - 17\,550x_2 + 27.94x_3 - 24.38x_4 \quad (11)$$

$$y = 34.16 - 1.55x_1 - 15\,987x_2 + 16.54x_3 + 16.94x_4 \quad (12)$$

$$y = 446.4 - 4.2x_1 - 57\,612.4x_2 - 388.6x_3 + 5\,056x_4 \quad (13)$$

利用多元线性回归模型对综合平衡法和矩阵分析法得到的最优配比进行预测,另作了补充试验对其优化配比结果进行验证,其指标值与试验验证值对比见表4。

由表4可知,预测值与试验结果平均误差不超过5%,故采用多元线性回归方法对推荐水泥土配比的相关指标数值进行预测是可靠的。此外,通过定义较优综合配比为指标值优于前50%,来进一步对比两种优化配比方法的适用性。以高岭土为例,较优综合配比为流动性大于76.5 mm,浊度小于97.56 NTU,7d强度大于202.96 kPa。根据矩阵分析法得到的高岭土水泥土配比,其流动性指标达到前43.8%(81.6 mm),浊度指标达到前37.5%

(87.4 NTU),强度指标达到前18.8%(345.1 kPa),满足较优综合配比指标的预期。根据综合平衡法得到的高岭土水泥土配比,其流动性(94.5 mm)虽然由于矩阵分析法的配比,但浊度仅达到前62.5%(104.2 NTU),不符合较优综合配比。淤泥土对比结果相同,表明矩阵分析法得到的配比性能指标仍优于综合平衡法。

基于上述研究,提出一种抗分散水泥土配比设计方法。首先,开展正交试验并进行矩阵分析,优选水泥土流动性、抗分散性和抗压强度位列前50%的一组配比。然后,基于正交试验进行多元线性回归模型,预测优化配比的指标值,并校验是否满足设计要求。若不满足,增大各因素下水平取值范围,重复试验分析至满足要求。根据本文试验结果和分析,推荐高岭土水下抗分散水泥土配比为抗分散剂HPMC(HPMC对水泥土抗分散性和强度的提高最显著),抗分散剂掺量为1‰,含水量2倍液限,水泥掺量14%;淤泥土水下抗分散水泥土配比为抗分散剂EVA(由于淤泥土水泥土流动性较低,故对流动性削弱最小且抗分散性还不错的EVA更合适),抗分散剂掺量0.75‰,含水量1.8倍液限,水泥掺量14%。

表4 优化配比预测值和试验值

Table 4 Predicted and experimental values of optimum ratio

土的类型	多指标配比 优化方法	流动性/mm		浊度/NTU		7 d强度/kPa	
		预测	试验	预测	试验	预测	试验
高岭土	综合平衡法	91.71	94.5	100.39	104.2	256.3	278.4
	矩阵分析法	79.96	81.6	89.64	87.4	338.5	345.1
淤泥土	综合平衡法	41.82	38.9	49.06	46.2	290.3	307.5
	矩阵分析法	43.88	45.5	51.22	48.7	403.17	418.3
平均误差		4.01%		4.4%		4.77%	

3.4 抗冲刷特性验证

为探究本文提出的两种抗分散水泥土配比的抗冲刷特性,使用河海大学泥沙起动实验装置进行水泥土起动实验。实验装置主要包括一段封闭玻璃水槽、流量阀、流量计、试样顶推系统、蓄水池循环系统等。方形有机玻璃水槽的断面尺寸为3 cm×15 cm,有效长度为2.5 m,水槽的最大流量可达40 L/s,矩形水槽有效段的最大流速可达8.89 m/s,如图13所示。

将两种抗分散水泥土按其配比制备并装进土



图13 泥沙起动实验装置

Fig.13 Sediment start-up experimental device

样筒内,并将表面刮平,使用顶推装置将水泥土样推至其表面与水槽底部齐平。冲刷实验开始以后,慢慢转动水阀,使流量缓慢增加,观察试样表面颗粒运动状态,当肉眼观察发现试样已满足起动标准

时,立即停止转动,维持该流量直至下一次测试。实验结果如图14所示。

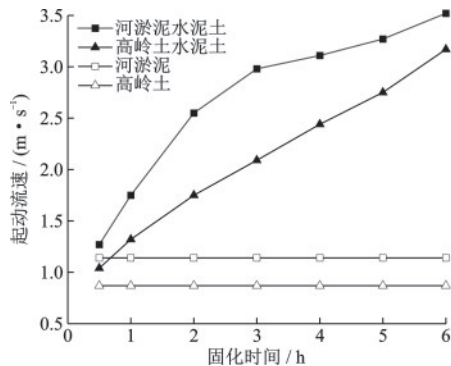


图14 起动流速实验结果

Fig.14 Results of initiation flow velocity experiment

由图14可知,抗分散水泥石土的起动流速随着固化时间的增加而增加,且两种本文推荐配比的抗分散水泥石土在泥沙起动实验中的抗冲刷特性明显优于原始土样,在固化6h后均可抵御3m/s以上的水流,抗冲刷性能良好。

4 结论

本文基于正交试验,研究了高岭土、淤泥土水下抗分散水泥固化土性能指标和因素影响,对比了不同多指标配比优化方法,同时建立了多元线性回归模型进行性能指标预测,所得结论如下:

(1) 正交试验表明,对于高岭土,抗分散剂掺量从0.25%增大到1%,水泥石土流动度减小20%,浊度减小25%,抗分散剂掺量对流动性和抗分散性的影响显著。对于淤泥土,对抗分散性影响显著的仍是抗分散剂掺量,但对流动性影响显著的是含水量,含水量从1.4 w_L 增大到2.0 w_L ,水泥石土流动度增大45%。

(2) 研究提出了一种抗分散水泥石土配比设计方法。基于正交试验结果进行矩阵分析,优选一组水泥石土流动性、抗分散性和抗压强度均前50%的配比,再基于正交试验结果进行多元线性回归预测该配比的指标值,以此校验是否满足设计要求,若不满足,增大各因素下水平取值范围,重复试验分析至满足要求。

(3) 基于本文研究,推荐高岭土抗分散水泥石土配比为抗分散剂HPMC,抗分散剂掺量1%,含水量2倍液限,水泥掺量14%;淤泥土抗分散水泥石土配比

为抗分散剂EVA,抗分散剂掺量0.75%,含水量1.8倍液限,水泥掺量14%。两种本文推荐配比的抗分散水泥石土在泥沙起动实验中的抗冲刷特性明显优于原始土样。

参考文献:

- [1] 陈金路,张翔宇,郑向远,等.海上风电智能运维关键技术与发展建议[J].海洋开发与管理,2023,40(6):117-128.
Chen J L, Zhang X Y, Zheng X Y, et al. Key technologies and development suggestions for intelligent operation and maintenance of offshore wind power[J]. Ocean Development and Management, 2023, 40(6): 117-128. (in Chinese)
- [2] 王勇强,陈静,兰小华,等.单桩基础冲刷对海上风电结构的影响[J].武汉大学学报(工学版),2020,53(增1):192-195.
Wang Y Q, Chen J, Lan X H, et al. Influence of the scour around a single pile foundation on the structure of the offshore turbine[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2020, 53(Sup1): 192-195. (in Chinese)
- [3] 陈琛,马宏旺,李玉韬,等.冲刷对海上风电单桩基础自振频率影响的研究[J].振动与冲击,2020,39(22):16-22.
Chen C, Ma H W, Li Y T, et al. Effects of scour on the natural frequency of offshore wind turbine structures[J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(22): 16-22. (in Chinese)
- [4] 袁建中.固化土在海上风电单桩基础冲刷修复中的应用[J].中国海洋平台,2021,36(4):46-50.
Yuan J Z. Application of stabilized soil in scour repair of offshore wind power single pile foundation [J]. China Offshore Platform, 2021, 36(4): 46-50. (in Chinese)
- [5] 孙业君,何奕成,王俊,等.海上风电平台地震监测实验站记录的南黄海M3.8地震初探[J].防灾减灾工程学报,2022,42(6):1351-1353.
Sun Y J, He Y C, Wang J, et al. A preliminary investigation of an M3.8 earthquake in the South Yellow Sea recorded by an experimental offshore wind power platform based seismic station [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2022, 42(6): 1351-1353. (in Chinese)
- [6] 张小玲,刘建秀,杜修力,等.风浪流共同作用下海上风电基础与海床的动力响应分析[J].防灾减灾工程学报,2018,38(4):658-668.
Zhang X L, Liu J X, Du X L, et al. Dynamic response

- analysis of offshore wind power foundation and seabed under the combined wind, wave and current loadings [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2018, 38(4): 658-668. (in Chinese)
- [7] 丁健, 谢锦波, 王菁, 等. 原位淤泥固化技术在海上风电单桩基础防冲刷中的研究与应用[J]. *中国港湾建设*, 2022, 42(8): 18-21.
Ding J, Xie J B, Wang J, et al. Research and application of in-situ solidification technology in monopile foundation scour protection for offshore wind turbines [J]. *China Harbour Engineering*, 2022, 42(8): 18-21. (in Chinese)
- [8] 沈晓雷, 郭健, 张海涛, 等. 固化土加固海上风电桩基水平承载特性研究[J]. *水道港口*, 2023, 44(1): 118-123.
Shen X L, Guo J, Zhang H T, et al. Study on the horizontal bearing characteristics of offshore wind power pile foundation protected by solidified soil [J]. *Journal of Waterway and Harbor*, 2023, 44(1): 118-123. (in Chinese)
- [9] Wang J, Xie J B, Wu Y J, et al. An investigation of the effect of utilizing solidified soil as scour protection for offshore wind turbine foundations via a simplified scour resistance test [J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2022, 10(9): 1317.
- [10] Khayat K. Effects of antiwashout admixtures on fresh concrete properties [J]. *ACI Materials Journal*, 1995, 92: 164-171.
- [11] Abbas A, El-wakil A, El-basel E, et al. Effect of admixtures on the performance of anti-washout concrete [J]. *Springer Nature*, 2023: 49-62.
- [12] 逢鲁峰, 黄凌苗, 贾广贺, 等. 水下不分散灌浆料的制备及性能研究[J]. *混凝土与水泥制品*, 2023, 5(10): 16-20.
Feng L F, Huang L M, Jia G H, et al. Preparation and performance study of anti-washout underwater grout material [J]. *China Concrete and Cement Products*, 2023, 5(10): 16-20. (in Chinese)
- [13] 高礼雄, 崔皓. 铝酸盐水泥基砂浆抗分散性研究[J]. *混凝土与水泥制品*, 2020, 12(1): 69-72.
Gao L X, Cui H. Study on anti-dispersion of aluminate cement based mortar [J]. *China Concrete and Cement Products*, 2020, 12(1): 69-72. (in Chinese)
- [14] 汪隆裕, 胡旭斌, 刘倩, 等. 基于海相淤泥土的流动化处治试验研究[J]. *建材世界*, 2023, 44(2): 30-33.
Wang L Y, Hu X B, Liu Q, et al. Experimental study on fluidization treatment based on marine silt soil [J]. *The World of Building Materials*, 2023, 44(2): 30-33. (in Chinese)
- [15] 丁华柱, 申隐杰, 都增延, 等. 偏高岭土改性再生骨料混凝土的试验研究[J]. *重庆建筑*, 2023, 22(2): 52-56.
Ding H Z, Shen Y J, Du Z Y, et al. Experimental study on metakaolin modified recycled coarse aggregate concrete [J]. *Chongqing Architecture*, 2023, 22(2): 52-56. (in Chinese)
- [16] 王宇峰, 陈钱宝, 梅晓君, 等. 掺杂EVA胶粉的硫铝酸盐-硅酸盐复合防腐砂浆制备及性能研究[J]. *胶体与聚合物*, 2022, 40(1): 3-7.
Wang Y F, Chen Q B, Mei X J, et al. Study on preparation and properties of sulphoaluminate silicate anticorrosive mortar doped with EVA rubber powder [J]. *Chinese Journal of Colloid & Polymer*, 2022, 40(1): 3-7. (in Chinese)
- [17] 公路工程无机结合料稳定材料试验规程: JTG E51—2009 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2009.
- [18] 地面用水泥基自流平砂浆: JC/T 985—2005 [S]. 上海: 同济大学出版社, 2005.
- [19] 水下不分散混凝土试验规程: DL/T 5117—2021 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2021.
- [20] 刘瑞江, 张业旺, 闻崇炜, 等. 正交试验设计和分析方法研究[J]. *实验技术与管理*, 2010, 27(9): 52-55.
Liu R J, Zhang Y W, Wen C W, et al. Study on the design and analysis methods of orthogonal experiment [J]. *Experimental Technology and Management*, 2010, 27(9): 52-55. (in Chinese)
- [21] 员学锋, 吴普特, 冯浩. 聚丙烯酰胺(PAM)的改土及增产效应[J]. *水土保持研究*, 2002, 9(2): 55-58.
Yuan X F, Wu P T, Feng H. Role of polyacrylamide on soil structure and increasing yield [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2002, 9(2): 55-58. (in Chinese)
- [22] 王赫, 程洪, 黄国敏, 等. 本构因子及环境因子水对土壤粘聚力的影响分析[J]. *南昌工程学院学报*, 2019, 38(1): 60-66.
Wang H, Chen H, Huang G M, et al. Analysis of impact of constitutive factors and environmental factor (water) on soil cohesion [J]. *Journal of Nanchang Institute of Technology*, 2019, 38(1): 60-66. (in Chinese)
- [23] 张浩浩. 高岭土表面润湿性的分子动力学研究[J]. *化工矿物与加工*, 2023, 52(5): 9-12.
Zhang H H. Study on molecular dynamics of surface wettability of kaolinite [J]. *Industrial Minerals & Processing*, 2023, 52(5): 9-12. (in Chinese)

(本文编辑: 张艺)

(下转第 744 页)