



马来西亚东海岸码头堆场泥炭土地基中 水泥搅拌桩的处置效果及参数分析*

胡成超¹, 王凌霄², 王艳萍¹, 李康², 沈宇鹏²

(1. 中交公路规划设计院有限公司, 北京, 100010; 2. 北京交通大学土木建筑工程学院, 北京, 100044)

摘要: 以马来西亚东海岸某码头内堆场水泥搅拌桩处理泥炭土工程为研究背景, 开展水泥桩室内配合比试验、试桩终孔参数分析、试桩工效分析等工作, 系统研究多种配合比条件下水泥搅拌桩复合地基的强度变化和处置效果。结果表明: 由于两试桩点土层分布及工程性质不同, 试桩点 1 采用 16%、18%、20% 3 种配合比时, 28 d 芯样无侧限抗压强度 (UCS) 普遍高, 强度富余度较大; 试桩点 2 采用 18%、20%、22% 3 种配合比时, 7~9 m 处强度低于其他深度, 建议采用 18% 的水泥掺量; 表层腐植土地段采用其他加固措施或挖除换填的工艺来保证施工质量。最终, 使用水泥搅拌桩加固泥炭土可以取得较好的效果。

关键词: 泥炭土; 地基处理; 水泥搅拌桩; 无侧限抗压强度

中图分类号: U655

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)11-0204-07

Treatment effect and parameter analysis of cement mixing pile in peat soil foundation of wharf yard on east coast of Malaysia

HU Chengchao¹, WANG Lingxiao², WANG Yanping¹, LI Kang², SHEN Yupeng²

(1. CCCC Highway Consultants Co., Ltd., Beijing 100010, China;

2. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: Based on the peat soil treatment project of cement mixing piles in the inner yard of a wharf on the east coast of Malaysia, we carry out the indoor mixing ratio test of cement pile, the final hole parameter analysis of the test pile, and the engineering efficiency analysis of test pile. Meanwhile, we systematically study the strength change and treatment effect of cement mixing pile composite foundation under various mixing ratios. The results show that due to the different soil layer distribution and engineering properties of the two test pile sites, the 28-day core unconfined compressive strength (UCS) of test pile site 1 is generally high with large strength surplus under the ratios of 16%, 18%, and 20%. At test pile point 2, the strength at 7~9 m is lower than that at other depths when 18%, 20%, and 22% are adopted, and thus 18% cement content is recommended. The surface humic soil section adopts other strengthening measures or excavation and replacement processes to ensure the construction quality. Finally, the utilization of cement mixing piles to strengthen the peat soil can yield good results.

Keywords: peat soil; foundation treatment; cement mixing pile; unconfined compressive strength

马来西亚是世界上第九大泥炭土拥有国, 约有 8% 的国土被泥炭土覆盖, 东海岸某码头堆场周围沼泽区广泛分布泥炭土。泥炭土地基具有压缩

性高、承载力低等特点, 而码头堆场的建设对地基沉降、整体稳定性具有较高的要求。水泥土搅拌桩具有技术成熟、经济高效等特点, 在淤泥、

收稿日期: 2023-02-17

*基金项目: 中交集团 2021 年重点研发项目 (2021-ZJKJ-18)

作者简介: 胡成超 (1986—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事公路路面路基设计工作。

淤泥质土等软土地基的加固工程实践中得到了广泛应用^[1-2]。

目前, 众多学者在水泥土搅拌桩加固传力机理及多种影响因素下的成桩效果等方面开展了大量研究。郝志斌等^[3]针对富集火山灰淤泥结构特性, 采用适宜的水泥土配合比参数和合适的施工工艺进行现场试桩, 结果表明水泥土搅拌桩适用于富集火山灰淤泥的地基加固; 欧红亮等^[4]研究两种工法的加固机理、施工设备和工艺, 明确了实际施工效果及利弊, 提出实际使用建议; 郑刚等^[5]、孙磊等^[6]通过模型试验和有限元模拟等方法, 揭示了水泥旋喷搅拌桩的受力特征及破坏机理; 曹支才等^[7]、叶彩娟^[8]通过调整水泥粉煤灰掺量, 揭示了不同因素下的力学特性及工后沉降等变化规律; 关喜才^[9]、黄雨等^[10]研究分析新型岩土(ESC)和石膏等固化剂在水泥土搅拌桩的微观机理及优化地基加固效果。

研究表明水泥搅拌桩适用于一般软土及一些特殊软土(如富含火山灰淤泥)的成桩及加固, 但未考虑在泥炭土等其他特殊软土中的地基加固效果。

泥炭土的工程特性具有一定的多变性和复杂性, 国内外学者已研究了近半个世纪, 但受植被类型、成分、形成年代、地形地貌、气候条件等因素的影响, 马来西亚不同地区泥炭土物质组成及工程性质差异极大, 具有较强的地域性和时间性; 马来西亚泥炭土地区地质水文条件较为复杂, 通过理论计算和数值模拟难以对实际施工进行科学的指导。因此在正式施工前, 开展室内配合比试验和现场工艺性试桩, 严格控制水泥土搅拌桩施工质量, 现场在试验基础上进行大规模应用, 试验结果旨在为解决国内外软土地基类似工程设计提供参考。

1 试验方案

1.1 工程概况

试验区软土主要特征为厚度分布不均、软土

基底起伏较大、工程力学性质较差、受降雨影响较大、对地基稳定性与沉降影响较大。

根据勘察资料, 该区域软土厚度为 3~15 m, 有机质含量不均匀。根据设计要求深层水泥搅拌桩(DSM)处理区域合计约 400 万延米, 选择试桩点 1 和 2 两处为 DSM 试桩。试桩点 1 分布有软土、粉质黏土、粗砂、强风化砂岩; 试桩点 2 常年积水表层含约 3 m 深腐殖土, 下层有粉质黏土、粗砂。试桩点 1 和 2 均有较厚的软土层, 具有很强的代表性和典型性。根据勘探资料得出两试桩点土性参数, 见表 1。

表 1 试桩点 1、2 土性参数

试桩点	天然含水率/%	湿密度/(g·cm ⁻³)	有机质含量/%	液限/%	塑限/%	塑性指数
1	125	1.373	10.4	80.0	23.0	57
2	135	1.473	12.6	82.0	22.0	45

为了更科学的指导施工, 严格控制水泥土搅拌桩施工质量, 在正式施工前, 须进行现场工艺性试桩, 其目的是: 1) 检验室内试验所确定的配合比、水灰比是否合适; 2) 验证“二喷四搅”工艺对地质的适用情况; 3) 确定合理的施工工艺及参数; 4) 根据 28 d 龄期水泥土无侧限抗压强度试验确定施工水泥掺量, 进行工效分析, 以指导大面积施工。

1.2 DSM 室内配合比试验

1.2.1 试桩点 1 室内配合比设计

取 3~7 m 范围土样进行室内配合比试验, 共 5 组, 配合比分别为 16%、18%、20%、22%、24%, 为模拟现场施工情况, 试样制作时每组取相同质量土样, 控制水灰比一次均匀搅拌成形, 放入湿度为 95%、温度为 21℃ 的恒温恒湿箱中养护至规定龄期, 然后进行无侧限抗压强度试验。试验强度值见表 2, 并对同一掺量不同龄期的强度增长(图 1)及同一龄期不同掺量的强度增长(图 2)进行对比。

试验最终选定 16%、18%、20% 3 种配合比进行现场试桩。

表 2 试桩点 1 初步室内试验配合比

配合比/ %	UCS/MPa		
	7 d 龄期	14 d 龄期	28 d 龄期
16	1.27	1.41	1.57
18	1.54	1.65	1.80
20	1.66	1.79	1.99
22	1.72	1.89	2.10
24	1.90	2.08	2.23

表 3 试桩点 2 初步室内试验配合比

配合比/ %	UCS/MPa		
	7 d 龄期	14 d 龄期	28 d 龄期
14	0.69	0.93	1.07
16	0.91	1.05	1.17
18	1.01	1.17	1.30
20	1.14	1.30	1.42
22	1.22	1.33	1.47

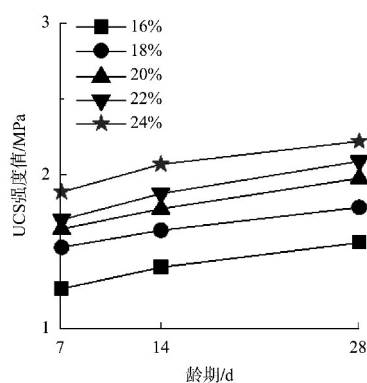


图 1 试桩点 1 各掺量下, 强度值随龄期变化

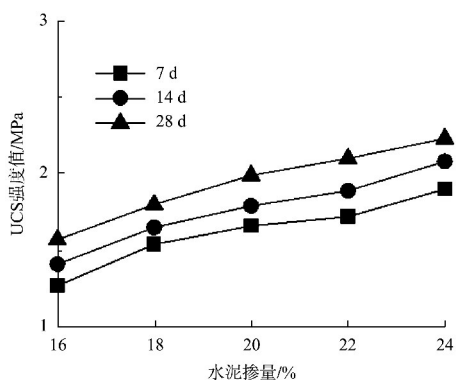


图 2 试桩点 1 各龄期下, 强度值随掺量变化

1.2.2 试桩点 2 室内配合比设计

取 3~10 m 深的土样进行室内配合比试验, 共 5 组, 配合比分别为 14%、16%、18%、20%、22%, 试样制作及养护条件与试桩点 1 相同, 进行无侧限抗压强度试验, 试验强度值见表 3。并对同一掺量不同龄期的强度增长(图 3)及同一龄期不同掺量的强度增长(图 4)进行对比。

试验最终选定 18%、20%、22% 3 种配合比进行现场试桩。

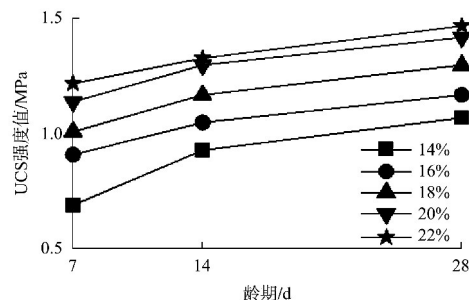


图 3 试桩点 2 各掺量下, 强度值随龄期变化

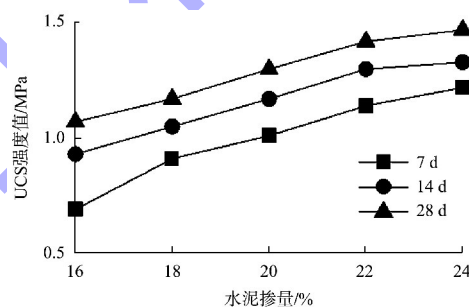


图 4 试桩点 2 各龄期下, 强度值随掺量变化

1.3 试桩点及试验内容

1.3.1 试桩点 1 位置选择

试桩点 1 软土特点为厚 4~9 m 的粉质黏土, 试桩数 $N=2\sim6$ 根。试桩点 1 各深度土样见图 5。



a) 0~5 m, 粉质黏土



b) 5~10 m, 粉质黏土, 夹粗砂



c) 10~15 m, 粗砂, 强风化砂岩

图 5 试桩点 1 土样

试桩共 5 组, 每组 6 根, 其中常规试桩 3 组, 补充试桩 2 组, 试验桩参数见表 4。着底标准为: 原则上以设计桩长作为终孔指标, 当达到终桩地层砂层或砂质黏土层的上一层地层 SPT 值(标准贯入试验)小于 4 或小于 8 时, 需满足实际桩长减去设计桩长大于 -0.5 m, 并小于 2 m, 则认为可以终孔。当按照所列终孔标准得到的实际桩长满足实际桩长减去设计桩长大于 2 m, 或小于 -0.5 m 时, 需进行判断。

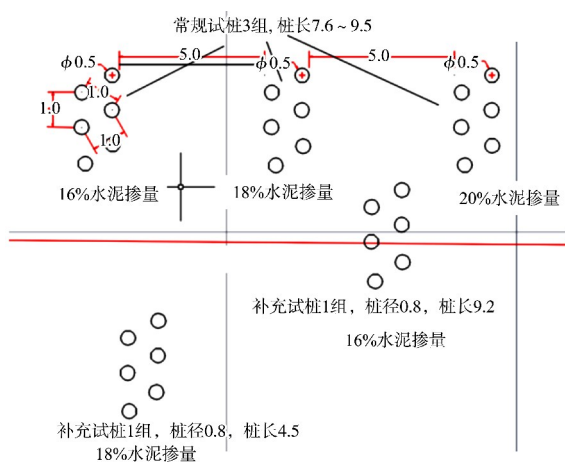


图 6 试桩点 1 试桩桩位布置 (单位: m)

表 4 试桩点 1 试验桩参数

试桩	水泥掺量/%	桩径/m	桩长/m
常规试桩	16	0.5	7.9~9.5
	18	0.5	7.9~9.5
	20	0.5	7.9~9.5
补充试桩	16	0.8	9.2
	18	0.8	4.5

1.3.2 试桩点 2 位置选择

试桩点 2 软土厚度 5~9 m, $N=1\sim 8$ 根。试桩点 2 各深度土样见图 7。



a) 0~2.9 m, 腐殖土



b) 2.9~7.9 m, 粉质黏土



c) 7.9~11 m 粉质黏土, 11~12 m 粗砂

图 7 试桩点 2 土样

试桩共 5 组, 每组 4 根, 其中常规试桩 3 组, 补充试桩 2 组, 试验桩参数见表 5, 着底标准与试桩点 1 相同。

表 5 试桩点 2 试验桩参数

试桩	水泥掺量/%	桩径/m	桩长/m
常规试桩	18	0.5	13.0
	20	0.5	13.0
	22	0.5	13.0
补充试桩	18	0.5	18.0
	20	0.5	18.0

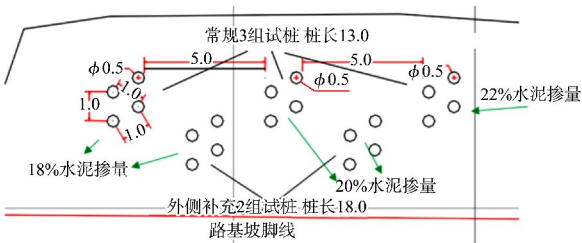


图 8 试桩点 2 试桩桩位布置 (单位: m)

2 结果分析

2.1 试桩终孔参数

2.1.1 试桩点 1 终孔参数

采用机械电流与设计桩长双重控制的方式, 施工以 3 挡下钻, 电流约 50 A 基本稳定, 深度达 5.0 m 后, 电流表数值开始小幅度上升, 至终孔位置电流表摆动幅度变大, 卷扬机钢丝绳开始松弛; 调至 2 挡继续下钻, 电流表在 80~140 A 区间摆动, 钢丝绳持续松弛, 下钻速度基本为 0。

为了解土层情况, 在试桩点 1 进行带水空钻, 钻入深度 11.0~12.5 m。试桩桩径 0.5 m, 打入深度 10.2 m; 桩径 0.8 m, 打入深度 9.3 m。设计桩长约 9.0 m。

钻入深度 5.2~7.3 m; 5.0 m 深度时位置卡钻, 将档位从 3 挡降为 2 挡, 向土层下钻进约 3 min, 进尺约 0.2~0.5 m, 钻杆叶片全部损坏。

2.1.2 试桩点 2 终孔参数

在施工前 3 组试桩时, 设计建议桩长 13.0 m, 施工开始 3 挡下钻, 电流约 50 A 基本稳定, 深度达 8.0 m 后, 钻杆遇到硬质夹层, 电流表摆动幅度变大, 数值小幅度上升至 80 A。钻杆穿越夹层后电流又回到初始位置约 50 A, 当钻头钻进至设

计试桩桩长 13.0 m 时, 电流和钢丝绳未明显变化, 在试桩现场按照设计桩长终孔。所以, 补充 2 组试桩, 桩长为设备打入地层的极限深度, 机械电流变化与前 3 组一样, 当钻杆钻进到 18.0 m 时, 钢丝绳开始松弛, 钻杆不向下继续钻进, 遇到硬质岩层, 过程持续约 1 min, 试桩现场按照设备极限打入 18.0 m 桩长终孔。

根据地勘资料, 17.0 m 深度时地质情况为密实砂含碎石, SPT 值为 50, 已无法继续钻进, 机械设备打入性能与地质情况基本相符。桩径 0.5 m, 钻入深度 17.0~18.0 m, 设计桩长约 18.0 m。

2.2 强度对比

2.2.1 试桩点 1 芯样强度

DSM 桩基强度除表层 0.5 m 的 1 个取芯试块强度为 0.6 MPa 外, 其他试块均满足 28 d 无侧限抗压强度值大于 1MPa 的设计要求。每个水泥掺量取 3 组芯样(其中 16%取 4 组芯样), 见表 6、7, 对不同掺量下芯样强度值进行对比, 见图 9。

表 6 常规试桩 3 组、桩径 0.5 m 时, 试桩点 1 芯样强度值

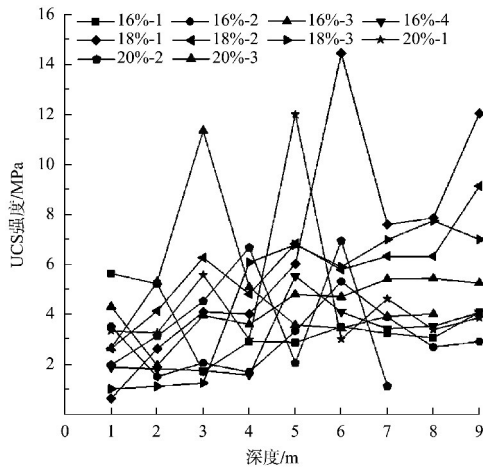
水泥掺量	UCS 强度/MPa
16%-1	5.64、5.23、1.72、2.92、2.88、3.51、3.25、3.07、4.09
16%-2	3.52、1.51、2.06、1.69、3.34、5.32、3.89、2.7、2.91
16%-3	4.32、1.96、3.96、3.6、4.81、4.71、5.42、5.44、5.26
16%-4	1.89、1.82、1.75、1.58、5.54、4.1、3.43、3.53、4.08
18%-1	0.63、2.63、4.1、4.02、6.02、14.47、7.61、7.87、12.06
18%-2	2.64、4.14、6.28、4.82、6.84、5.8、6.34、6.34、9.15
18%-3	1.02、1.12、1.25、6.09、6.8、5.91、7.0、7.76、7.01
20%-1	1.98、3.14、4.53、6.68、2.06、6.96、1.13
20%-2	2.65、5.31、11.37、5.1、3.58、3.45、3.93、4.02
20%-3	3.35、3.26、5.58、2.99、12.02、3.02、4.63、3.39、3.87

注: 每米取 1 个试块, 深度 1.0~9.0 m。

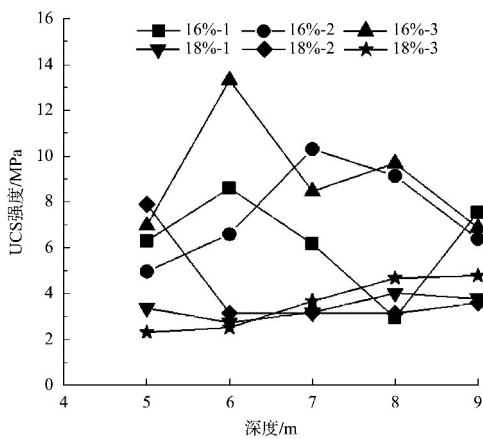
表 7 补充试桩 2 组、桩径 0.8 m 时, 试桩点 1 芯样强度值

水泥掺量	UCS 强度/MPa
16%-1	6.31、8.61、6.18、2.96、7.56
16%-2	4.98、6.61、10.32、9.14、6.40
16%-3	6.98、13.32、8.47、9.70、6.89
18%-1	3.38、2.75、3.20、4.03、3.79
18%-2	7.91、3.16、3.17、3.15、3.61
18%-3	2.33、2.53、3.68、4.68、4.80

注: 每米取 1 个试块, 深度 5.0~9.0 m。



a) 常规试桩3组



b) 补充试桩2组

图 9 试桩点 1 芯样强度变化

试桩点 1 处 28 d UCS 芯样强度普遍高, 强度富余度较大, 见图 9。推荐使用 16% 水泥掺量配合比。针对此类土质, 也可通过现场多次取样, 降低水泥掺量, 增加 10%、12%、14% 水泥掺量配合比, 优化室内配合比设计, 得到更经济、合理的水泥掺量。

2.2.2 试桩点 2 芯样强度变化规律

由于表层 0~3.0 m 存在腐殖土, 有机质含量差异较大, 整体成桩效果不连续, 部分试块强度未达到 1 MPa, 但 3.0~18.0 m 芯样强度满足设计要求, 每种水泥掺量取 2 组芯样测 UCS 强度值, 28 d UCS 强度值见表 8。

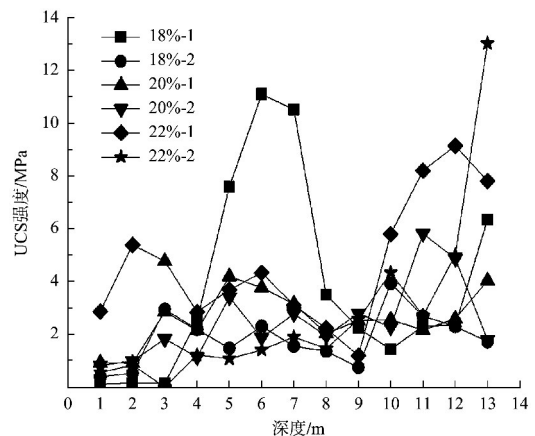
表 8 常规试桩 3 组、桩长 13.5 m 时, 试桩点 2 芯样强度值

水泥掺量	UCS 强度/MPa
18%-1	0.10、0.15、0.13、2.54、7.59、11.10、10.53、3.50、2.23、1.43、2.31、2.34、6.35
18%-2	0.39、0.52、2.94、2.19、1.47、2.30、1.55、1.36、0.75、3.93、2.69、2.30、1.72
20%-1	0.92、0.91、2.85、2.15、4.19、3.77、3.15、2.03、2.52、2.55、2.16、2.59、4.03、
20%-2	0.82、0.99、1.82、1.14、3.40、1.87、2.77、1.94、2.79、2.27、5.82、4.87、1.79
22%-1	2.86、5.39、4.77、2.84、3.69、4.33、3.10、2.23、1.19、5.80、8.21、9.15、7.81
22%-2	0.55、0.83、0.00、1.22、1.07、1.41、1.90、1.46、2.57、4.34、2.70、5.01、13.03

注: 每米取 1 个试块, 深度 1.0~13.0 m。

在腐殖土等有机质含量差异较大的地段, 水泥掺量为 20% 或 22% 时, 试块强度达到要求且较为稳定, 见图 10a)。根据试验结果可为正式施工的水泥掺量配合比提供参考, 在类似地段可适当提高水泥掺量以保证施工要求及效果。

在试桩点 2 进行 2 组补充试桩, 得到芯样强度值总体变化, 见图 10b)。试桩点 2 对于 3.0 m 以下的土样, 取芯 28 d 强度达到设计要求, 但根据现场取芯结果显示, 7.0~9.0 m 有 1 层红色黏土夹层, 强度为 1.19~2.23 MPa (表 9), 低于其他深度的强度, 为保证成桩质量, 配合比无优化空间, 建议采用 18% 的水泥掺量进行正式 DSM 施工。



a) 常规试桩3组

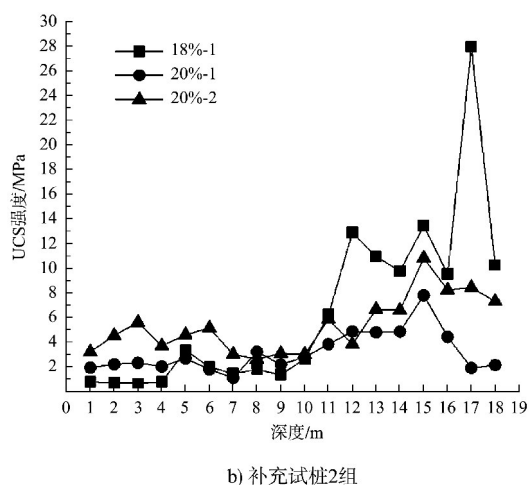


图 10 试桩点 2 芯样强度变化

表 9 补充试桩 2 组、桩长 18.0 m 时, 试桩点 2 芯样强度值

水泥掺量	UCS 强度/MPa
18%	0.84、1.53、6.32、9.98、1.65、1.84、1.71、1.51、1.41、1.12、1.55、0.49、0.00、0.00、0.00
18%-1	0.80、0.70、0.66、0.79、3.35、1.99、1.46、1.80、1.36、2.66、6.22、12.90、10.95、9.78、13.45、9.54、27.99、10.26
20%-1	1.94、2.22、2.34、2.03、2.68、1.80、1.11、3.23、2.20、2.81、3.84、4.88、4.81、4.87、7.81、4.44、1.92、2.15
20%-2	3.22、4.55、5.62、3.72、4.60、5.16、3.02、2.62、3.10、3.02、5.87、3.85、6.67、6.60、10.83、8.24、8.44、7.32

注: 每米取 1 个试块, 深度 1.0~18.0 m。

2.2.3 施工建议

表层 0~3.0 m 腐殖土由于有机质含量高、差异大, 试桩点 2 整体成桩质量较差, 建议表层腐殖土区域采用其他加固措施或挖除换填。在其余区域和深度使用水泥搅拌桩可行, 水泥掺量根据室内配合比试验推荐采用 18%。

3 结论

1) 从室内配合比试验、现场成桩质量和处理效果来看, 水泥搅拌桩适用于马来西亚东海岸大面积区域富含有机质的泥炭土, 桩基芯样强度富余; 在特殊的表层腐殖土分布区域段, 水泥掺量

须超过 30% 以上才可能达到施工要求, 施工成本较高, 可换用其他加固措施。通过在马来西亚东海岸码头堆场泥炭土地基中水泥搅拌桩的试桩处置效果分析, 可为沿海等地区的泥炭土及特殊软土的处治提供参考。

2) 水泥搅拌桩成桩效果受地基土的特性影响较大, 成桩的质量直接影响地基加固的效果和安全, 因此在泥炭土等特殊软土中大规模施工前应进行室内配合比试验和现场试桩, 获得合适的施工参数, 保证成桩质量, 并使地基处理效果达到要求。

参考文献:

- [1] 贝建忠, 赵瑞东, 李伟仪, 等. 水泥搅拌桩复合地基综合强度指标方法在岸坡设计中的适用性分析[J]. 水运工程, 2022, (5): 184-190.
- [2] 温宇轩, 贺九平. 水泥搅拌桩在软土路基施工中的应用研究[J]. 灾害学, 2019, 34(S1): 236-242.
- [3] 郝志斌, 王道伟. 水泥土搅拌桩处理富集火山灰淤泥的适用性分析[J]. 水运工程, 2018, (11): 43-47, 59.
- [4] 欧红亮, 龙海飏, 赵丽娟, 等. 水泥搅拌桩浆喷法和粉喷法在软基处理中的研究分析[J]. 公路, 2022, 67(5): 119-122.
- [5] 郑刚, 姜忻良, 顾晓鲁. 水泥搅拌桩荷载传递机理研究[J]. 土木工程学报, 2002(5): 82-86.
- [6] 孙磊, 宋春雨, 陈龙珠. 水泥旋喷搅拌桩复合锚杆荷载传递机理研究[J]. 人民黄河, 2020, 42(2): 147-151, 154.
- [7] 曹支才, 王光辉. 不同因素对水泥搅拌桩强度影响的试验研究[J]. 中外公路, 2020, 40(3): 283-287.
- [8] 叶彩娟. 水泥掺量对搅拌桩复合地基沉降的影响分析[J]. 铁道建筑, 2018, 58(12): 96-99.
- [9] 关喜才. 新型固化剂 ESC 在搅拌桩中的应用研究[J]. 岩土力学, 2008(11): 3149-3152.
- [10] 黄雨, 周子舟, 柏炯, 等. 石膏添加剂对水泥土搅拌法加固软土地基效果影响的微观试验分析[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(8): 1179-1183.

(本文编辑 赵娟)