

跨海大桥群桩冲刷固化土防护研究及应用

李诗琦

[上海公路桥梁(集团)有限公司,上海市 200433]

摘要: 跨海大桥桩基长期遭受水流冲刷而在桩基周围形成冲刷坑,冲刷深度较深、受力情况较差的桩基需及时开展冲刷防护施工。固化土冲刷防护技术,不仅能实现桩基防护,还能修复桩基承载力。依托跨海大桥冲刷防护工程,首次将固化土冲刷防护技术引入到群桩冲刷防护中,并开展海上泵送施工技术和水下施工监测方法研究。结果表明,固化土浆液能够自流填平冲刷坑和群桩间隙,凝固后能够达到抵抗水流冲刷的防护效果。固化土防护面层的范围、标高、坡度、厚度和强度等指标均满足施工要求。研究成果应用于工程实践,对于完善桥梁全寿命周期管理具有积极的意义。

关键词: 群桩冲刷;固化土防护;海上施工方法;水下施工监测

中图分类号: U445

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)05-0331-04

Research and Application of Solidified Soil Protection against Pile Group Erosion in Cross-sea Bridge

LI Shiqi

[Shanghai Highway and Bridge (Group) Co., Ltd., Shanghai 200433, China]

Abstract: The pile foundation of cross-sea bridge is scoured by water flow for a long time, and the scour pit is formed around the pile foundation. The pile foundation with deep scour depth and poor bearing condition needs to be timely scoured and protected. The erosion protection technology of solidified soil can not only protect the pile foundation, but also restore the bearing capacity of pile foundation. Relying on the scour protection engineering of cross-sea bridge, the erosion protection technology of solidified soil is firstly introduced into the erosion protection of pile group, and the offshore pumping construction technology and underwater construction monitoring method are studied. The results show that the solidified soil slurry can fill the clearance of scour pit and pile group by self-flow, and can achieve the protection effect against water scour after being solidified. The range, elevation, slope, thickness and strength of solidified soil protective facing all meet the construction requirements. The application of the research results to engineering practice has a positive significance for improving the whole life cycle management of bridges.

Keywords: pile group erosion; solidified soil protection; offshore construction method; underwater construction monitoring

0 引言

由于跨海大桥桥墩和桩基的阻水作用,水流易在桩基周围产生向下射流和尾迹涡流,前者冲起海床泥砂,后者带走海床泥砂^[1]。经年累月,桥墩桩基周围海床形成大规模的冲刷坑^[2]。随着冲刷坑逐渐冲深,桥梁桩基有效入土深度不断减小,势必危害跨海大桥桩基及其上部结构的安全性和稳定性^[3]。

针对海上独立单桩基础局部冲刷问题,常采用

在桩体下部加设护圈或增设防护罩等主动防护方法。但是该方法仅能削弱水流冲刷,无法提升桩基周围海床面抗冲刷能力,达不到修复海上桩基的承载力的效果^[4]。针对海上群桩基础局部冲刷问题,常采用抛投袋装碎石、铺设软体排等被动防护方法进行回填施工,然而相关工程实践表明,该方法存在水下作业难度大、施工精度不可控和防护效果无法量化评估等问题^[5]。

固化土作为一种新型回填材料,其浆液凝固前具有良好的流动性,浆液能够自发地将坑洞和构筑物间隙填充密实。凝固成型后的固化土结构具有强度高、整体性好、表面平整并且可形成一定坡度,能

收稿日期: 2024-04-10

基金项目: 上海市科委创新行动计划(22DZ1208903)

作者简介: 李诗琦(1990—),男,学士,工程师,从事道路桥梁施工管理工作。

够有效地抵抗水流长期冲刷作用。然而目前大多数固化剂仅能够对低含水率泥浆进行固化,对于高含水率疏浚原状泥浆(含水率 70%~80% 以上)、工程废弃泥浆(含水率 150%~400%)、高含水率海洋泥浆泥浆(含水率 150%~250% 以上)等没有能有效固化,无法直接固化高含水率废弃淤泥、泥浆,并用于海上桩基冲刷防护工程中。

部分学者已针对高含水率固化土的制备和应用开展研究。研制了高含水率固化剂,能够制备流淌性十分优异的固化土浆液,在沟槽、肥槽和管道等狭小空间回填中得到了广泛的应用^[6]。江苏坤泽等研制了 H01 型固化剂,并制备出了一种用于水下泵送施工的高流态、高黏性和高稳定性固化土浆液,并成功应用于海上风电单桩基础冲刷防护工程中^[7]。然而鲜有报道高含水率固化土在跨海大桥群桩冲刷防护工程中的研究和应用。

鉴于跨海大桥群桩基础冲刷危害和现有抛石防护技术的不足,首次将固化土冲刷防护技术引入到跨海大桥群桩防护工程中。首先基于创新改造后的施工船,形成了海上制备和泵送固化土浆液的施工方法。然后采用多波束测深技术跟踪扫测固化土防护施工前后冲刷坑地形,评估固化土防护施工质量,验证固化土放冲刷面层的长期防护效果。

1 工程概况

某跨海大桥位于杭州湾以东、长江口以南,长期受到洋流和往复潮汐水流冲刷,因此冲刷情况非常严重。目前跨海大桥沿线桩基周围已形成大量冲刷坑,平均冲深约 2~3 m,最深超过 5 m,并且每年持续冲深约 20 cm。冲刷深度较深、受力状况较差的桩基是跨海大桥结构稳定的重大安全隐患,亟需进行冲刷防护。根据跨海大桥设计单位校核和业主单位整体安排,选取了 PM123 和 PM230 两个桥墩进行固化土防护典型试验施工,重点研究跨海大桥群桩固化土防护施工技术,验证复杂海况中的固化土的长期防护效果。

如图 1 所示,PM123 两幅桥墩为分离式,共布置 14 根直径 1.5 m 的钢管桩,其周围冲刷坑最大冲深约为 6 m。

如图 2 所示,PM230 两幅桥墩为整体式,共布置 16 根直径 1.5 m 的钢管桩,其周围冲刷坑最大冲深约为 7.5 m。

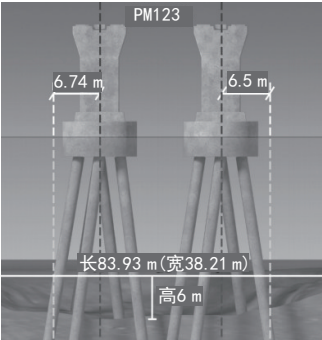


图 1 PM123 桥墩布置形式和冲刷坑形态三维重建

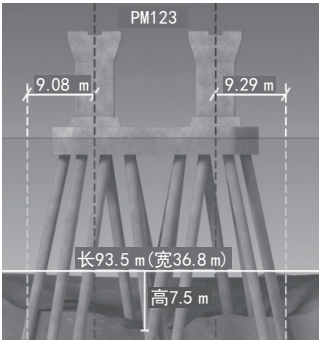


图 2 PM230 桥墩布置形式和冲刷坑形态三维重建

2 固化土冲刷防护施工

2.1 固化土原材料与配比

根据前期模拟试验表明,固化土可充分利用多水环境,快速改变淤泥特性,在海水内 3 h 初凝,24 h 终凝,处理后的高含水率淤泥可满足各类工程性能指标需求。对固化土进行海洋环境检测,检测结果表明,固化土各项指标均在合格范围内,不会对海水及海洋生物造成污染。

现场采用高含水率淤泥、海水和无机固化剂作为原料,按照表 1 所示配比混合、拌制,制备得到固化土浆液。

表 1 固化土配比			
名称	淤泥土	水	固化剂
体积/质量	125.2 m ³	125.2 m ³	19.6 m ³
体积比	1	1	0.16
体积/质量	125.2 m ³	125.2 m ³	19.6 m ³

固化土浆液凝固后的主要性能指标要求见表 2。

表 2 固化土主要性能指标	
项目	指标
无侧限抗压强度 q_u /kPa	≥500
黏聚力 c /kPa	≥65
内摩擦角 φ /(°)	≥23
冲刷起动流速/(m·s ⁻¹)	≥4.0

2.2 海上直接泵送施工

如图 3 所示,改造后的制浆船上设置有泥浆池和泥浆泵,主要用于制备和泵送固化土浆液。

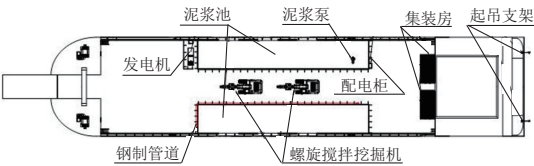


图 3 制浆船改造设计

如图 4 所示,改造后的定位船上设置有电动起吊装置,主要用于调整泵浆管头的下放点位和方向。

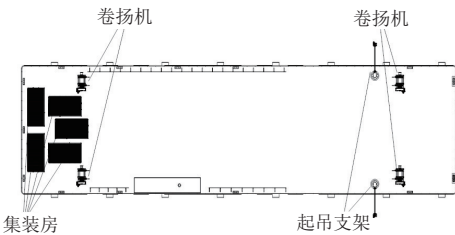


图 4 定位船改造设计

项目现场主要采用定位船、制浆船等 7 艘施工船开展海上泵送固化土施工。如图 5 所示,定位船通过拖轮带动,并通过卷扬机松、紧锚链,准确地停靠在距离施工桥墩约 8 m 的海面上。制浆船停在定位船后方约 150 m 的海面上,并通过海上浮筒管道与定位船连通。定位船将泵浆管头下放至冲刷坑内进行水下直接泵送固化土浆液,形成主要由管头、浮筒管道和泥浆泵组成的海上固化土防护施工的完整管路。



图 5 海上泵送固化土施工布置

在制浆船上设置 2 个制备池,如图 6 所示,将原土通过挖机转入制备池中,同时加入海水借助专用搅拌设备进行搅拌直至搅拌均匀。固化剂依据前期试验确定的掺量进行添加,制备固化土浆液。

固化土浆液制备完成后,如图 7 所示,下放泵浆管头至冲刷坑内,启动泥浆泵,可直接将固化土浆液泵送至冲刷坑内,实现海上群桩冲刷坑固化土防护施工。该技术单次可完成约 200 m³的固化土浆液泵送施工,单日可完成超过 1 000 m³的固化土浆液泵送施工。



图 6 原土加水进行搅拌



图 7 下放泵浆管头过程中

3 水下施工监测方法

固化土泵送施工前、施工过程中和施工完成后,均采用多波束测深技术对冲刷坑地形进行跟踪扫测,实现全过程水下施工监测。

3.1 施工前扫测

根据跨海大桥设计单位核算结果,为了保证桥墩桩基承载要求和结构长期稳定性,两个桥墩的回填范围应为桩周边 2.5 m 范围内(横向 40 m,纵向 20 m)厚度不低于 1.5 m,中心负误差不大于 500 mm。固化土回填标高为施工控制标准,PM123 墩固化土回填控制标高应达到-15.5 m,PM230 墩固化土回填控制标高应达到-16 m。如图 8 所示,根据施工前期多波束测深声呐扫测数据,采用三维重建技术进行分析,可得到 PM123 墩群桩冲刷坑需要回填固化土 4 732 m³;如图 9 所示,PM230 墩需要回填固化土 3 151 m³。

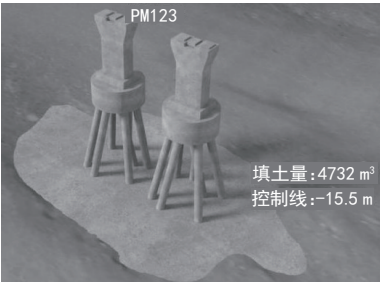


图 8 PM123 桥墩群桩冲刷坑回填方量计算

3.2 施工过程中分阶段扫测

固化土水下泵送施工过程中,泵浆管头的状态、



图9 PM230桥墩群桩冲刷坑回填方量计算

固化土浆液局部堆积等问题对施工质量影响极大。现场施工时,采用多波束测深技术,分阶段多次扫测冲刷坑形态。通过对比各施工阶段扫测结果,能够计算得到固化土浆液的流淌范围和留存方量,指导下阶段泵管头位置和朝向等施工参数的确定,及时调整后续泵送施工方量和施工计划,保障固化土防护施工质量。

3.3 施工完成后周期性扫测

固化土施工完成后,每间隔3个月开展一次周期性扫测。通过对比施工前和施工后冲刷坑形态扫测数据,能够分析得到施工完成的固化土防冲刷面层的范围、标高、坡度和厚度等关键信息,用以评价固化土防护施工质量。通过跟踪分析冲刷坑形态周期性扫测数据,验证固化土防冲刷面层的长期防护效果。

4 固化土防护施工结果分析

4.1 固化土防护面层施工要求

为了保证桥墩桩基承载要求和结构长期稳定性,固化土防护施工应满足以下要求。

(1) PM123墩固化土回填控制标高应达到-15.5 m, PM230墩固化土回填控制标高应达到-16 m。

(2) 固化土防护面层中心高程负误差不大于0.5 m,且桩周边2.5 m范围(横向40 m、纵向20 m范围)内厚度不低于1.5 m。

(3) 坑顶与坑底固化土表面以坡度衔接,但需保证最小厚度要求,且连续覆盖,不得出现断开。

4.2 PM123墩固化土防护施工结果

如图10所示为施工前、后PM123墩冲刷坑形态扫测热力图,计算得到共留存固化土5 357 m³,留存率为86.5%(施工方量6 194 m³)。施工前冲刷坑内标高普遍小于-19 m,中心标高小于-20 m。施工完成后,冲刷坑内标高普遍抬升至-15.5 m以上。桩周边2.5 m范围内厚度为4~5 m,并且坑顶到坑底形成了坡度。

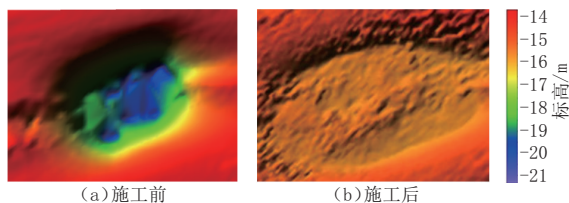


图10 PM123墩冲刷坑扫测热力图

4.3 PM230墩固化土防护施工结果

如图11所示为施工前、后PM230墩冲刷坑形态扫测热力图,计算得到共留存固化土3 253 m³,留存率为84.6%(施工方量3 844 m³)。施工前冲刷坑内标高普遍小于-20 m,中心标高小于-21 m。施工完成后,冲刷坑内标高普遍抬升至-16 m以上。桩周边2.5 m范围内厚度为3~5 m,并且坑顶到坑底形成了坡度。

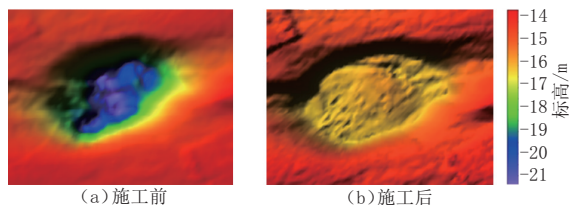


图11 PM230墩冲刷坑扫测热力图

4.4 固化土性能检测结果

施工时留样制备了固化土试块,在施工现场海水中养护28 d后开展了强度检测,检测结果表明,固化土试块无侧限抗压强度 q_u 超过700 kPa,黏聚力 c 超过70 kPa,内摩擦角 φ 超过30°。

综上所述,固化土防护面层的范围、标高、坡度、厚度和强度等指标均满足施工要求。

5 结 语

(1) 固化土浆液具有良好的流动性,能够自流填平冲刷坑和群桩间隙,修复桩基承载力。凝固后能够形成板块状、具有坡度的防冲刷面层,达到抵抗水流冲刷的防护效果。

(2) 为避免泵送管道堵塞,搅拌过程中应有专人对搅拌池中的垃圾进行清捞,防止垃圾堵住泵头。固化土泵送完成后,需及时进行泵头及管道的冲洗工作,泵头及管道内不应残留固化土。

(3) 高含水率海洋淤泥(疏浚淤泥)、工程废弃泥浆、黏质土、松软土、普通土、淤泥黏土等均适用于固化土的制备。砂性土、粉质黏土也可用于固化土的制备,但要严格控制其含砂率不超过5%。

(4) 对固化土取样送检,检测结果显示固化土属于清洁疏浚物,不含有害物质,对海洋生态无害,可

(下转第362页)