

DOI: 10.16799/j.cnki.csdqyh.240794

# 桥梁桩基冲刷固化土防护施工技术及措施

王会丽

[上海公路桥梁(集团)有限公司,上海市 200433]

**摘要:** 依托东海大桥桥墩桩基固化土防护典型施工试验工程,详细开展了海域桥梁桩基泥浆固化土冲刷防护施工工艺研究。首先借鉴了海上风电单桩基础固化土防冲刷施工工艺,有针对性地分析了海域桥梁群桩基础固化土冲刷防护工艺施工难点;然后开展了海上泥浆固化土现场制备工艺的研究,并充分考虑海洋潮汐等环境因素的影响,阐述了固化土浆液的制备要点和泵送施工关键技术,并对其防护效果进行检验。结果显示:泥浆固化土在海域桥梁桩基冲刷防护工程中具有良好的抗冲刷能力,其水下施工流失率可控,适应性较好,可为后续泥浆固化土技术在海域桥梁桩基冲刷防护工程中的推广应用提供借鉴参考。

**关键词:** 泥浆固化土;海域桥梁;桩基冲刷;防护工程

**中图分类号:** U455.7+5;TV866

**文献标志码:** B

**文章编号:** 1009-7716(2025)03-0307-04

## Construction Techniques and Measures for Protection of Scour Solidified Soil on Bridge Pile Foundation

WANG Huili

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

**Abstract:** Based on the typical construction test project of solidified soil protection of pier pile foundation of Donghai Bridge, the construction technology of slurry solidified soil scouring protection of bridge pile foundation in sea area is studied in detail. Firstly, based on the anti-scouring construction technology of solidified soil for offshore wind power single-pile foundation, the construction difficulties of solidified soil scouring protection technology for bridge pile group foundation in sea area are specifically analyzed. Then, the on-site preparation process of marine slurry solidified soil is studied, and the influence of environmental factors such as ocean tide is fully considered. The preparation essentials of solidified soil slurry and the key technology of pumping construction are expounded, and its protective effect is tested. The results show that the slurry solidified soil has the good anti-scouring ability in the scouring protection project of bridge pile foundation in sea area, and its underwater construction loss rate is controllable and has good adaptability, which provides a reference for the popularization and application of slurry solidified soil technology in the scouring protection project of bridge pile foundation in sea area in the future.

**Keywords:** slurry solidified soil; bridges in sea area; pile foundation scouring; protection engineering

## 0 引言

桥梁桩基础冲刷灾害是引发桥梁安全事故的重要原因,对桥梁安全造成极大危害,对社会造成巨大损失,长期受到国内外众多学者的关注。据统计,2000—2014年我国桥梁运营阶段发生坍塌的106起事故中,由于桩基受到冲刷而导致桥梁坍塌的超过30%<sup>[1]</sup>,20世纪90年代至21世纪初,我国桥梁因水

毁事故导致的直接和间接经济损失高达100亿元<sup>[2]</sup>,桥梁桩基防冲刷灾害防护势在必行。受地理条件、面积等限制,陆上水域水流的规律较为容易得到,而海域环境受到约束力量较小,海上不规律的风暴等因素又加重了海域水流环境的复杂性质,导致海中桥梁基础受冲刷病害更加严重,需要更加精细的研究调查才能得到其冲刷规律和应对方法。

目前,针对海域中水流对跨海大桥桩基础产生的严重冲刷问题,主要采用回填、抛石、设置软排体障碍等传统手段处理,相关工程实践和文献表明这些方法施工难度较大、防护效果较弱<sup>[3]</sup>,迫切需要提出新工艺化解海域桥梁桩基冲刷问题。其中,固化土技术是近几年结合海上特有的工程环境研发出用

收稿日期: 2024-07-24

基金项目: 上海市市科委科研项目,工程泥浆制备海域桥梁桩基防冲刷回填材料技术与装备(22DZ1208903)

作者简介: 王会丽(1985—),女,硕士,高级工程师,从事市政工程建设管理工作。

于海上构筑物基础防护的新材料新技术,其利用海洋淤泥或工程废弃泥浆,添加无机复合型固化材料,采用化学固化方式,通过管道泵送系统,将超高含水率固化土浆液直接填至基础周围海床面,依靠可控的浆液流动性,自主流至需防护范围,其强度随着凝结过程的发展逐渐生长,最终在基础周围形成整板状的固化土防护结构。近些年,该方法在海上风电桩基冲刷治理工程中已有成功应用。截止目前,预计600余个海上风电桩基采用该方法进行治理。为验证该方法在桩基冲刷防护中的有效性,国内学者开展了试验探索。OuYang等<sup>[4]</sup>通过波浪水槽试验装置,在单桩基础周围水平海床上铺设水泥固化土,评估了固化土冲刷防护方法的效果。

本文依托东海大桥桥墩桩基础冲刷问题,展开海域桥梁桩基础冲刷固化土防护施工工艺及措施的研究。

## 1 工程概况

### 1.1 工程简介及周边环境

本文研究依托东海大桥桥墩桩基固化土防护典型施工试验工程,包含东海大桥PM123墩和PM230墩两桥墩桩基础的固化土防护工程。两桥墩位于东海大桥低墩区段内,在上海临港区海域,所在海域为强潮流作用区域,潮流呈往复流,为半日潮,往复的潮流是桥梁基础冲刷的主导动力。附近实测涨潮垂线最大流速为1.64~1.78 m/s,落潮垂线最大流速为1.50~1.68 m/s,大潮全潮平均流速为0.88~1.14 m/s,中潮为0.78~1.02 m/s,小潮为0.80~0.94 m/s<sup>[5]</sup>。

### 1.2 桥墩桩基础冲刷情况

PM123墩承台采用分离式布置,每墩布置7根1.5 m钢管桩,桩长55 m,桩顶标高2.5 m。桥墩桩基础最大冲刷深度标高-19 m,桩基周围床面标高约-12.3 m,最大冲刷深度约6.7 m,见图1。按设计要求,桩基防护填充控制标高为-15.5 m。

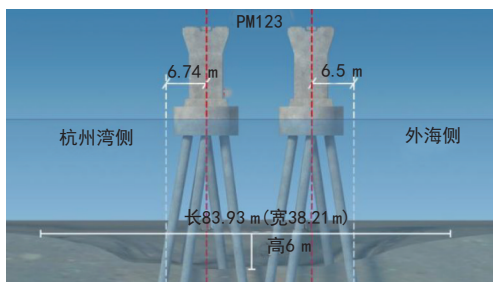


图1 PM123桥墩桩基三维模型立面图

PM230墩采用一体化承台、分离式墩台布置方式,每个墩台8根 $\phi 1.5$  m钢管桩,桩长57 m,桩顶标高2.5 m,桥墩桩基布置见图2,桩基冲刷等值线见图3,最大冲刷深度标高达-20 m,桩基周围床面标高约为-13 m,最大冲刷深度约6 m,按设计要求,桩基防护填充控制标高为-16 m。

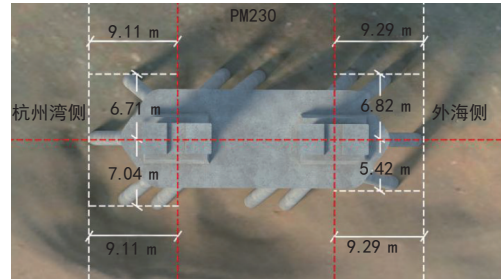


图2 PM230桥墩桩基三维模型平面图

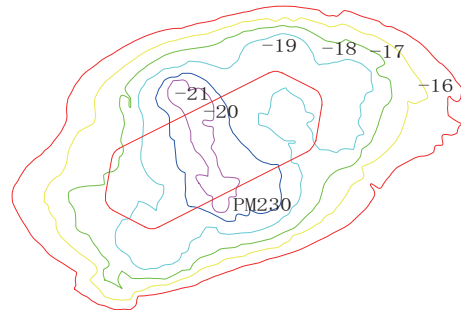


图3 PM230桥墩桩基冲刷坑标高等值线(单位:m)

### 1.3 泥浆固化土冲刷防护技术简介

泥浆固化土是一种绿色环保的新型冲刷坑水下回填材料,其浆液早期具有良好的流动性,将其泵送至桥梁桩基周围的冲刷坑中,浆液能够自发地将冲刷坑和桩土间隙填充密实<sup>[6]</sup>。成型后的固化土整体性好、表面平整且具有一定坡度,能够很好的抵抗水流的淘刷和冲刷作用。固化土冲刷防护技术已在单桩形式的海上风电冲刷防护工程中得到应用,长期扫测结果验证该技术防冲刷效果优异<sup>[7]</sup>。但是在跨海大桥群桩基础冲刷防护中还未有相关应用案例。

### 1.4 施工重难点分析

跨海大桥的桥墩桩基础形式复杂,为群桩形式,其冲刷机理、冲刷坑形态与单桩形式的海上风电桩基显著不同。固化土水下泵送施工受到海床底质、流速、固化剂配比、施工工艺适应性等多方面因素影响,因此海域桥梁桩基泥浆固化土防护面临诸多难点。相比于海上风电项目,跨海桥梁桩基防护工程有以下几个施工难点:(1)相比于海上风电的单桩基础,跨海桥梁的群桩基础对泥浆固化土的阻力更大,更不利于泥浆固化土的水下自流,对于泥浆固化土的流动性提出更高要求;(2)跨海桥梁工程处的海水

深度较大,水流速度相对较大,对泥浆固化土的水下抗流失性要求更高;(3)桥梁底有桥面限高,施工时船舶及设备要与桥底保持安全间距;(4)跨海桥梁的安全性要求更高,因此在海上船舶施工时,要确保船舶与桥墩之间的安全距离;(5)涉及海域桥梁的施工须严格遵循通航安全的有关技术要求,办理海上作业施工许可等,对于海上施工的安全措施提出更高要求。

## 2 固化土冲刷防护施工关键点

### 2.1 总体施工工艺

鉴于泥浆固化土首次应用于海域桥梁桩基防护存在诸多难点及不确定性,在东海大桥试验工程中,借鉴了海上风电桩基冲刷防护施工的成功经验,采用海上直接泵送的施工方案,即在海上直接利用制浆船配合定位船完成固化土的泵送。其中制浆船负责泥浆固化土制备,停靠在距离桥墩200 m左右的海面处;定位船为无动力平板驳,停靠在桥墩近处,用于定位泵送点位。该方案首先将原土和固化剂等原料运输至码头,并将其转运至制浆船上;待制浆船开至施工点后,在船上制备固化土泥浆,同时将其与定位船用管道连接起来,最后进行泵送施工。施工过程中,采用水下高清声呐进行实时监测,可根据水下泵送情况及时调整泵送点位。待施工完成后,进行水下多波束扫测,验证冲刷坑填充情况是否满足设计要求。该方案的施工流程见图4。

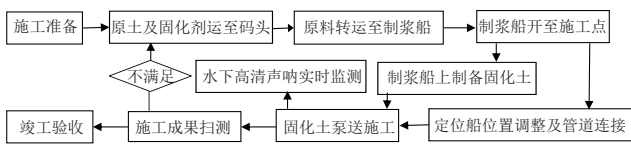


图4 泥浆固化土桩基防护施工工艺流程图

### 2.2 施工水下扫测

试验工程正式施工前,对施工桥墩处进行一次多波束扫测,根据扫测结果确定冲刷坑位置、泵送固化土的点位及方量。除在泵送施工过程中采用水下高清声呐进行动态实时监测外,还需对固化土初凝与终凝过程进行监测,确保凝固质量。每泵送一定量固化土后,进行施工中的阶段性扫测,验证固化土流淌性和留存量,为后续的泵送施工提供可靠的数据进行参考。泵送固化土完成后,及时进行工后扫测,验证试验冲刷坑内固化土泵送是否达到要求。竣工后,对试验墩固化土的防护效果进行定期扫测、跟踪分析评估。

### 2.3 固化土制备

原材料对固化土性能有较大的影响。固化土原材料包含土、固化剂和水。其中固化剂是一种复合型固化材料,可使土、水和固化剂三者之间产生相互关联、相互影响和相互促进的各类效应和作用,其有效成分在自身创造的碱性环境中发生充分的水化、水解反应,生成各种水化胶凝产物,从而具有一定的强度和稳定性。土材料选择黏性土,要求有机质含量小于5%,粉粒及以下颗粒(粒径不大于0.075 mm)含量不小于90%,最大颗粒粒径不大于50 mm;固化土所需水为海水,直接从海洋中抽取。固化土的28 d无侧限抗压强度不小于500 kPa,黏聚力不小于65 kPa。

在工程固化土施工前,首先开展固化土配合比试验。得到标准泥浆中固化剂的掺量为 $180 \text{ kg/m}^3$ ,含砂率不应大于5%,比重约1.3~1.5,固化土在东海海水内3 h初凝,24 h终凝。

固化土采用海上浆船上现场制备方法,制浆船上设置2个制备池,单个制备池设计方量为 $432 \text{ m}^3$ ,单次泥浆制备量约 $270 \text{ m}^3$ ,将原土通过挖机转至制备池中,原土加海水搅拌均匀后再加入固化剂后搅拌均匀。

### 2.4 船舶定位及管道连接

泥浆固化土施工过程中,需配备定位船1只,制浆船1只,锚拖兼警戒船1只,锚艇兼警戒船1只,交通艇1只。其中,定位船为无动力平板驳船,在航行和抛锚过程中需借助锚拖的动力带动行驶。最终把定位船稳定在桥梁承台边缘6~8 m的安全间距处。此时,制浆船停靠在距离定位船200 m左右的海面上,施工现场布置情况见图5。



图5 泥浆固化土桩基防护施工现场布置照片

泵送浮管加装好浮体并在制浆船上进行整体对接,制浆船与定位船连接的管道由锚艇协助对接。最后,通过定位船上的吊机把泵头下放至桥墩泵送点位,为泵送做准备。为避免泵头在水流作用下四处摆动,在泵头端部加设约2 t的配重块,确保泵头能稳妥放置在冲刷坑内的泵送点位处。

## 2.5 泥浆固化土泵送

为减少水下泵送泥浆固化土时的流失率,确保防护施工效果,选定仅在中、小潮汛的平潮期进行固化土泵送施工。完成一次潮期的泥浆固化土泵送后,收回泵头,将定位船撤到安全水域待命,并将泵送管道以及泵头进行冲洗,防止固化土凝固堵塞管道。如制浆船继续制备固化土进行泵送固化土施工作业,需要等待下一个平潮期。

## 3 泥浆固化土施工功效及防冲刷效果

### 3.1 泥浆固化土施工功效

根据两桥墩所处海域潮汐情况,中、小潮汛的平潮作业期下单次泵送时间约为30 min。其中,PM230墩共泵送固化土18次,累计作业时间为9 d,累计泵送固化土3 844 m<sup>3</sup>;PM123墩共泵送固化土31次,累计作业时间为7 d,累计泵送固化土6 738 m<sup>3</sup>。根据工程施工实践,海上泵送施工方法主要受制于海洋潮汐时间,同时也受海上制浆、存储及泵送效率的影响,导致单次作业时间较短,使得工程工期大幅增长。

### 3.2 泥浆固化土防护冲刷效果分析

采用多波束扫测等监测测量方法对固化土冲刷防护效果进行检验。分别在施工前、施工中和施工后进行了多波束扫测。根据扫测数据,分别绘制不同阶段的海床面抬升等高线图和标高热力图。以PM230墩为例,根据海床面标高热力图(见图6),施工前冲刷坑内较大范围标高小于-20 m,中心区域标高小于-21 m;泵送固化土1 764 m<sup>3</sup>后,冲刷坑内大部分区域标高抬升至-18 m以上;泵送完成后,冲刷坑内大部分区域标高抬升至-16 m左右,并在冲刷坑中间形成良好的坡度,使固化土防护结构具有较好的防冲刷效果;施工后近5个月再次扫测,结果显示填充状态基本无变化,验证了固化土具有较好的抗冲刷作用,能有效防止二次淘刷。

根据扫测结果,计算得到两个试验墩的实际流失率,见表1,两墩的流失率分别是15.4%和20.5%。首先,两墩固化土均有较大幅度的流失,这与泥浆固化土呈现液态、海洋中水流速度等有关。其次,两墩固化土流失率存在显著差异,其中体量较小的PM230墩累计泵送次数为18次,流失率较小,而体量较大的PM123墩累计泵送次数为31次,流失率较大,呈现出累计泵送次数越多流失率越大的表象。这可能因为每次泵送启动时,新泵入的泥浆固化土

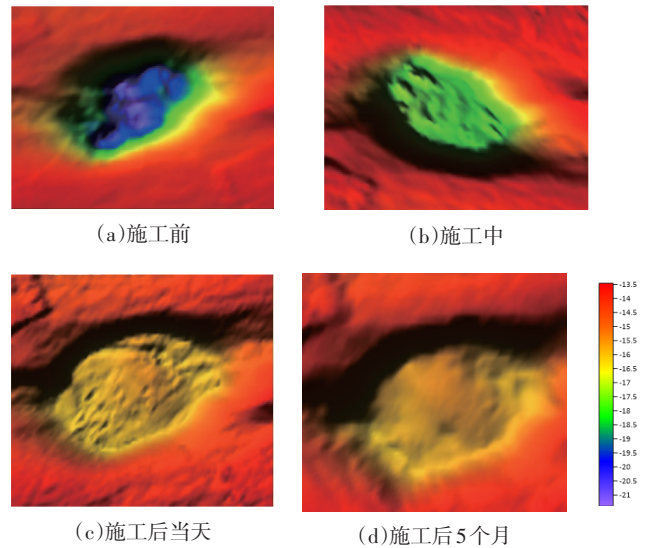


图6 PM230墩固化土施工前后扫测热力图对比

与原有的固化土之间的黏聚力有所减弱,导致每次启动泵入时,固化土泥浆都会有一定的流失,导致泵送次数越多,总体流失率越大;其次,也与两个坑所处位置水流环境有关,PM123墩冲刷坑较大一定程度上说明该墩所处位置的冲刷力度较大,因此固化土泵送时流失率较大;反之,PM230墩所处位置冲刷力度较小,泥浆固化土流失率较小。

表1 泥浆固化土施工扫测结果分析表

墩号	实际泵送量/m <sup>3</sup>	留存量/m <sup>3</sup>	流失率/%	留存率/%
PM230	3 844	3 253	15.4	84.6
PM123	6 738	5 357	20.5	79.5

综上所述,泥浆固化土在海域桥梁桩基冲刷防护工程施工中,其流淌范围、最终标高、留存厚度均满足设计要求,且其水下流失率在20%左右,在可控范围内,同时,据扫测结果可见,其抗冲刷防护效果良好。

## 4 结 语

东海大桥桩基冲刷防护试验工程首次在跨海桥梁领域中应用泥浆固化土防护技术,施工过程及结果表明:(1)泥浆固化土具有高流动性,可主动填补桩周冲刷坑,硬化后形成的整体具有一定强度和厚度,能够满足设计要求;(2)扫测结果表明,泥浆固化土在施工完5个月后未有明显变化,具有良好的抗冲刷作用,有效防止二次淘刷;(3)采用海上直接泵送施工方案,受天气、洋流等影响较大,导致工期较长,故建议在今后推广过程中,应开展比选陆上施工

(下转第315页)