

东海大桥桥墩过度冲刷区域防护技术研究

王 瑜

(上海市交通建设工程安全质量监督站, 上海市 200030)

摘 要: 东海大桥桥墩区域发生严重冲刷现象,部分群桩桥墩冲刷深度已超过设计警戒值,为确保大桥安全,对桥墩区域实施护底防护措施。本着控制桩基区域的冲刷深度和范围,增加海床抗冲刷能力,减少海床颗粒起动的原则,针对东海大桥桥墩受冲刷状态,首先计算防护所需护面块体重量,并确定了单个桥墩的防护范围;分别选取浅水区、深水区代表性桥墩开展防护试验,并给出试验中的施工流程和关键技术措施。后期监测结果证明大桥桥墩防护措施可靠有效。

关键词: 东海大桥;桥墩;冲刷坑;施工技术;水下监测

中图分类号: U446.1

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2022)06-0171-04

0 引 言

东海大桥是我国第一座外海跨海大桥,2005年建成通车,标志着中国大桥建设由江河时代迈入到海洋时代,更是让上海港跳出黄浦江,拥有了真正的深水码头岸线,为上海建成国际航运中心提供了重要的硬件环境。该大桥位于杭州湾东北部水域,北接上海芦潮港,南接小洋山岛洋山深水港区,设计标准为高速公路,设计速度80 km,桥梁总宽31.5 m,为双向6车道,全长约32.5 km。大桥的安全运行事关重大,其中群桩基础桥墩承台周边的冲刷坑是影响大桥结构安全的关键因素,国内外历史资料表明,桥墩基础冲刷是河口及沿海地区桥梁普遍存在的问题^[1]。苏通大桥主塔墩群桩基础施工中,采用了抛投袋装沙作防护,较好地解决了施工期间的桥墩冲刷问题^[2],但建成通车以后北侧桥墩附近河床冲刷严重,2017年对北引桥22个受冲刷桥墩紧急实施了抛石防护^[3]。我国对河流上的桥墩局部冲刷做过大量研究,但感潮河口及沿海地区的跨江跨海桥梁研究很少,东海大桥海域的自然环境条件极其复杂,桥墩区域冲刷受到水下构筑物与水流、波浪和泥沙的共同作用影响,对于其冲刷变化机理缺少了解。相邻的杭州湾跨海大桥也存在潮流冲刷问题,2020年底开发了桥墩局部冲刷的DAS动态监测系统,希望通过长期监测

桥墩周边海床面地形变化数据,开展桥墩周边冲刷状况及开展冲淤演变趋势分析。

区别于苏通大桥径流为主的感潮河段,东海大桥海域潮流表现为明显的往复流,流向基本垂直于东海大桥轴线。根据东海大桥海域历年冲淤监测结果显示,大桥桥址水域除局部略有淤积外,普遍处于冲刷状态,对比2017年和大桥建设前2002年的海床测图,已发生累计平均冲深2.0~3.0 m,最大冲深4~5 m^[4]。大桥建成后,桥墩冲刷坑随之出现并呈现逐年加深,部分桩基冲刷深度超过设计警戒值,桩身应力接近容许值。冲刷坑形态表现多样,其大小、方向、位置除了与自然条件相关外,还与墩台结构尺寸和群桩数量相关,总体呈现为迎水面和两侧冲刷大,发生有最大冲刷深度^[5]。为避免局部冲刷深度进一步增大而影响桩基安全,需对桥墩桩基承台及周边区域进行护底防护,确保东海大桥的结构和正常运营安全,国内外相似工程的实践案例较少。

1 工程方案

1.1 概述

东海大桥桥墩过度冲刷防护试验工程的原则是控制桩基区域的冲刷深度和范围,增加海床抗冲刷能力,减少海床颗粒起动。根据桥墩区域的冲刷形态,防护冲刷保护范围分为两部分,一部分为冲刷坑主体的保护,另一部分为冲刷坑两侧的保护,冲刷坑两侧的保护主要是防止冲刷坑主体保护后,冲刷坑周边水流形态发生变化,引起冲刷坑周边的冲刷。东海大桥海域

收稿日期: 2022-03-15

作者简介: 王瑜(1979—),男,硕士,高级工程师,从事交通建设工程施工安全质量管理工作。

潮汐类型为非正规半日浅海潮,潮汐日不等现象较为明显,落潮历时大于涨潮历时,平均水位 0.23 m (国家 85 高程,下同),平均高潮位 1.86 m,平均低潮位 -1.34 m,涨落潮流呈明显的往复流,流向基本垂直于东海大桥轴线,设计最大底流速 2.4 m/s。

1.2 护面块体重量计算

考虑采用防护结构表面抛块石或袋装混凝土增加海床的抗冲刷能力,稳定重量计算有多种计算方法,常用计算方法有铁道部科学研究院研究公式、美国高速公路管理局推荐的 Richardson 方法、Chiew (1995 年)推导公式和《防波堤与护岸设计规范》(JTS 154—2018)护底块石稳定重量的规定,底流速按 2.4 m/s 计,护面块体重量结算结果见表 1。

表 1 护面块体重量结算结果

计算方法	结果		备注
	重量 /kg	粒径 /cm	
铁道部科学研究院公式	59.4	35	最小粒径
Richardson 公式	91.6	40.7	中值粒径
Chiew 公式	44.7	32	中值粒径
防波堤与护岸设计规范	92	—	底流速 2.4 m/s

考虑施工海域流速较大且流场复杂,群桩阻水效应水流挟沙能力进一步加强,增加安全系数,护面材料的重量确定为 100~150 kg,换算粒径约为 40~50 cm。设计采用 100~150 kg 袋装混凝土作为护面材料。

1.3 单个桥墩防护范围计算

桥墩局部冲刷防护范围考虑适用性,采用戴荣尧公式。戴荣尧建议从设置防护时涡带的强度及其影响范围所涉及的因素来研究防护尺寸,通过将试验资料点绘并经曲线拟合,得以下计算式:

$$L=2.3K\sqrt{gh'}\left(\frac{v}{\sqrt{gh}}-0.135\right)^{0.5} \quad (1)$$

$$\frac{v}{\sqrt{gh}}>0.135 \quad (2)$$

式中: L 为墩前防护长度, m; K 为安全系数,采用 $K=1.3$; v 为一般冲刷后墩前行近流速, m/s; h' 为有效水深, $h'\approx h/2$, m; h 为一般冲刷后水深, m; g 为重力加速度, m/s²;

经计算,得到冲刷防护范围为桥墩基础周围约 10~15 m,具体根据不同桥墩结构尺寸及目前冲刷区域确定防护范围。

1.4 试验工程方案

为研究在不同自然条件和结构形式下防护工程的技术工艺和防护效果,分别选取浅水区、深水区代表性桥墩开展防护试验,积累数据、总结经验,为后续的东海大桥桥墩冲刷防护方案优化和全面施工等提供科学依据。本次防护设计选取 7 个典型桥墩,分别为 PM135~PM137、PM434、PM435、PM437、PM438。

(1)PM135~PM136:处于芦潮港侧浅水区,填充冲刷坑主体。-19.00 m 以下抛投袋装碎石作为反滤层,防止原冲刷坑底的淤泥及粉土底质受紊流作用而被淘刷;表层抛填 1.5 m 厚袋装混凝土干混料作为护面,防止表面冲刷。

(2)PM137:处于芦潮港侧浅水区,填充冲刷坑及冲刷坑两侧。冲刷坑填充方案同 PM135~PM136。两侧防护采用混凝土连锁块软体排+栅栏板压边:连锁块尺寸 0.48 m×0.48 m×0.20 m,间隔 0.02 m,软体排外侧连续布置栅栏板压边,尺寸为 6 m×6 m×0.40 m,间隔 0.40 m。

(3)PM434~PM435:处于小洋山侧深水区,填充冲刷坑及冲刷坑两侧防护,方案同 PM137。

(4)PM437:处于小洋山侧深水区,填充冲刷坑及四周防护,采用袋装碎石+袋装干混料+复合材料勾连体防护方案。主体防护区 43.21 m×28.74 m (横桥向×顺桥向)自下而上依次为:-22.00 m 以下抛投袋装碎石,-22.00~-20.50 m 抛投 1.5 m 厚袋装混凝土干混料,-20.50 m 以上抛投 1.00 m 厚袋装碎石。主体防护区四周分两层外扩抛投复合材料勾连体,分别是横桥向外 7.50 m、顺桥向外 6.25 m 抛投两层复合材料勾连体(每平方米不少于 8 个,单重约 30 kg),再向外横桥向 7.50 m、顺桥向 6.25 m 抛投三层复合材料勾连体(每平方米不少于 10 个,单重约 30 kg)。

(5)PM438:处于小洋山侧深水区,包括冲刷坑及四周防护,采用袋装碎石+袋装干混料+勾连体防护方案。主体防护区范围 48.01 m×35.06 m (横桥向×顺桥向)方案同 PM437。主体防护区四周抛投勾连体,向外横桥向 15 m、顺桥向 12.5 m 抛投三层勾连体(每平方米不少于 10 个,单重约 10 kg)。

2 施工工艺和关键技术

2.1 软体排铺设

混凝土连锁块软体排是一种较为常见的固沙保滩的防护设计,在长江口航道整治工程中普遍采用,

采用专业铺排船铺设,施工工艺成熟。该工程受东海大桥桥墩结构和水动力条件影响,软排体铺设方向为垂直于大桥轴线方向,从内向外铺设。为有效防止施工船舶碰撞桥墩,铺设时联锁块运输船顶流靠档铺排船,软体排铺设时铺排船由内往外顺流进行铺设。软体排护底铺设工艺流程如图1所示。

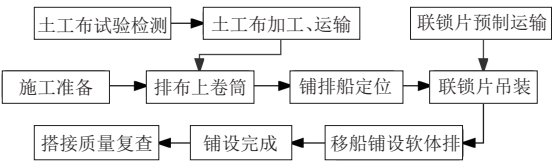


图1 软体排护底铺设工艺流程图

2.2 栅栏板安装

施工区域水深较深,PM137处泥面标高-13~-15 m,PM434、PM435处泥面标高-19~-23 m,栅栏板在安装过程中受水流影响易发生偏移,安装难度较大。本工程专门开发了定位系统软件,对栅栏板施工安装进行深水精确定位。测量定位系统由倾斜仪和两套GPS、红外线扫描仪、吊杆和吊索等组成,其原理为利用受力钢丝绳呈直线状态,施工过程中通过测量钢丝绳倾斜度,由水面上吊架坐标推算水下栅栏板坐标位置,并以图像形式在软件界面上显示。操作人员监控栅栏板、勾连体定位框的实时位置与与设计位置的相对关系,指挥吊车司机操纵起重设备,移动调整至设计位置。水下栅栏板定位安装流程如图2所示。

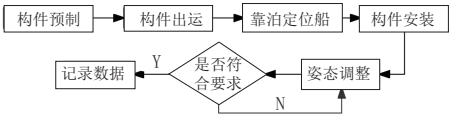


图2 水下栅栏板安装流程图

2.3 袋装碎石及干混料抛填

东海大桥桥墩跨度有50 m、60 m、70 m等,减去墩台宽度,桥墩间最小有效距离约40 m,一般非通航孔桥面以下有效净空高度8.8 m,桥墩群桩基础由8~20根钢管桩组成。针对该实际情况,传统的网兜抛石、开体驳抛石等施工工艺不能满足设计施工要求,现有船机设备无法实现在桥下驻船施工,进行冲刷坑核心区域抛填作业。施工专门设计研制了斜向溜筒抛石船^[6],对甲板驳改造设置斜向溜筒抛石机构,其具备台车横移、溜筒旋转变幅等功能。施工中可根据不同的水位及桩基情况,准确地斜向插入桩群内部,然后袋装碎石、干混料由皮带机喂料通过溜筒抛填至冲刷坑内部,减少对桩基的冲击及对保护层阳极块的刮蹭。同时,配套的三维监控软件实时显

示溜筒与任意钢管桩的相对位置关系,并具有碰撞报警功能,避免了溜筒插桩作业时对下部基础的影响。袋装碎石及干混料抛填工艺流程如图3所示。

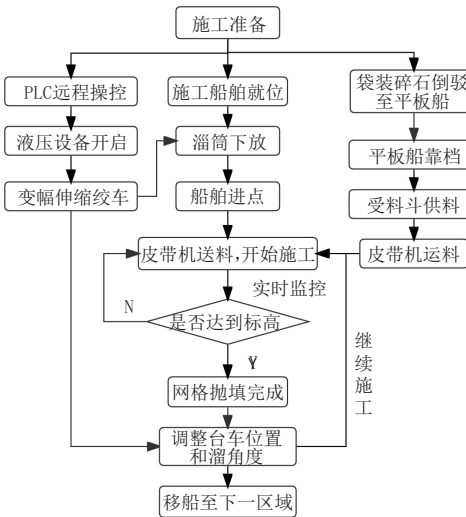


图3 袋装碎石及干混料抛填工艺流程图

2.4 主动勾连体安装

主动式勾连体外层为玻璃纤维增强复合材料,内部为C30混凝土,在深水区域人工直接抛投易受水流冲刷影响,水上抛投定位和漂移量很难精确控制。工程采用直径1 m的直溜筒进行定点定量抛投,可精确定位至距泥面1 m位置,按照设计的勾连体每平方模数,每平方8个或10个进行数量控制。抛填采用网格化控制,每个网格1 m×1 m进行编号,通过锚机进行船舶移动定位。

3 工后监测

东海大桥桥墩过度冲刷区域防护试验工程2019年5月主体完成,监测单位于7月开始工后测量,至2020年3月共开展8次多波束水深监测工作。监测过程中,发现抛填标高明显不到位的,利用袋装干混料进行补抛找平。监测结果显示:

(1)PM135、PM136、PM137桥墩区域冲刷仍有发展,对比2019年12月、2020年1月测量成果,低于设计标高的范围扩大,PM137桥墩桩基中部附近出现较大低于-16.0 m标高的区域。2020年3月测量成果表明桥墩桩基中部区域存在局部低洼坑。

(2)PM434、PM435桥墩防护软体排铺设整体良好,少数压排栅栏板有相互翘搭和超排布边界情况。测量显示2019年8月-11月对低于设计标高区域补抛后水下地形比较稳定,未发现明显的冲刷现象。

(3)PM437、PM438桥墩冲刷坑周边防护勾连体基本上按设计范围抛投,且基本围成“回”形区域,但

PM438 桥墩西侧存在约 15 m 缺口。测量显示 2019 年 8 月至 11 月对低于设计标高区域补抛后水下地形比较稳定,未发现明显的冲刷现象。

(4)桥墩两侧防护范围外的地形均有冲刷,PM434-PM435、PM437-PM438 附近冲刷较大,2018 年 6 月至 2020 年 3 月,平均冲刷深度约 1.5 m;PM135-137 附近冲刷相对较小,2018 年 6 月至 2020 年 3 月,平均冲刷深度约 0.7 m。

4 结 语

(1)大桥桥墩过度冲刷区域的防护设计方案总体效果明显,达到试验工程目的。东海大桥海域冲淤变化呈现为冲刷态势,防护工程的实施,保证了桥墩防护区域的稳定;填充结构基本稳定,软体排及勾连体保护区域水深未发现明显变化;但桥墩防护范围以外的冲刷仍在持续,后续应继续做好定期监测。

(2)监测结果分析表明,冲刷坑抛填存在泥沙淘蚀、抛填料下沉的情况,实施了护面护滩防护的冲刷坑稳定性明显较好,因此防护措施的完整性对防护效果至关重要。由于海域水深流急,软体排铺设、栅栏板压边的施工工效低,有必要对设计方案或施工工艺进行完善。

(3)抛填袋装碎石和干混料施工中,水流波浪条件对施工安全质量的影响干扰都很大,船舶锚泊定位难,抛填料整体平整度不佳,存在部分区域标高低于设计要求。水下抛填料施工需研究进一步改进施工设备,提高桩群中心区抛填的安全控制和水下抛填质量精度。

(4)护面使用袋装干混料工程效果不佳。专项试验显示,2019 年 5 月 17 日使用钢丝网兜将干混料试验样本吊放施工水域,2019 年 12 月 10 日取出检查,编制袋完好,干混料部分凝结成块体但较为松散,硬化强度未能达到设计要求。

参考文献:

- [1] 孙晨.不同水流冲击角对于桩群局部冲刷的影响研究[D].南京:南京水利科学研究院,2009.
- [2] 高正荣,黄建维,卢中一.苏通大桥主塔墩冲刷防护工程关键技术[J].水利水运工程学报,2005(2):18-22.
- [3] 何超.苏通大桥桥墩冲刷防护工程研究[J].现代交通技术,2020(3):46-49.
- [4] 东海大桥桥墩冲淤状况专项检测技术报告[R].上海:交通运输部东海航海保障中心上海海事测绘中心,2017.
- [5] 韩昇林.东海大桥桥墩冲淤状况分析[J].公路桥梁,2016(27):134,152.
- [6] 毛娟龙,杨磊.东海大桥深水群桩基础防冲刷设计与施工[J].施工技术(中英文),2021(15):112-114.

(上接第 109 页)

法研究[J].安全与环境学报,2021,21(3):949-956.

[45] 范小花,丁允超.城市污水管网气体爆炸风险评估[J].工业安全与环保,2016,42(8):32-34.

[46] Najafi M, Kulandaivel G. Pipeline condition prediction using neural network models[C]//Optimizing Pipeline Design, Operations, and Maintenance in Today's Economy. Texas:ASCE, 2005:767-781.

[47] Sousa V, Matos J P, Almeida N, et al. Risk assessment of sewer condition using artificial intelligence tools: application to the SANEST sewer system[J]. Water science and technology, 2014, 69(3):622-627.

[48] 徐得潜,张倩.基于 AHP-GRA 的合流制污水管道风险评估[J].安全与环境学报,2019,19(4):1149-1154.