

基于局部冲刷分析的深水基础施工工艺研究

刘聪聪¹, 朱映滔²

(1. 中国电建集团江西省电力设计院有限公司, 江西 南昌 330096; 2. 中交二航局第三工程有限公司, 江苏 镇江 212004)

摘要: 水下基础局部冲刷对其自身及上部结构的安全稳定性均具有重大影响。以某跨江大桥深水基础为研究对象, 构建三维局部冲刷数学模型, 量化分析强冲刷河段群桩及围堰冲刷特征。结果表明群桩前三排桩之间冲刷较大, 钢围堰迎水面两端角处发生强烈冲刷; 采用规范公式、数学模型方法, 钢围堰局部最大冲刷深度较群桩分别增加 58%~69%, 40%~46%, 钢围堰若在汛期着床, 底部冲刷严重, 脱空面积较大; 针对强冲刷河段超大埋深式基础施工, 建议枯水期先进行冲刷防护, 其后开展围堰着床、下沉, 最后进行钻孔桩施工, 待汛期来临前再进行冲刷防护。

关键词: 水下基础; 局部冲刷; 数学模型; 群桩; 钢围堰

中图分类号: TV5; U445.55*6; TU997

文献标志码: B

章编号: 1009-7716(2025)11-0225-05

Research on Deepwater Foundation Construction Technology Based on Local Scour Analysis

LIU Congcong¹, ZHU Yingtao²

(1. PowerChina Jiangxi Electric Power Institute Co., Ltd., Nanchang 330000, China; 2. China Communications Second Harbor Engineering Bureau Third Engineering Co., Ltd., Zhenjiang 212004, China)

Abstract: The local scouring of underwater foundations significantly affects the safety and stability of both the foundation itself and the superstructure. Using the deepwater foundation of a cross-river bridge as a study case, a 3D numerical model of local scouring is built to quantitatively analyze the scouring characteristics of group piles and cofferdams in the intensely scouring river section. The results indicate that there is significant scouring among the first three rows of piles in the pile group, and the intense scouring occurs at the two corners of the water-facing side of the steel cofferdam. By using the standard formulas and the mathematical modeling methods, the maximum local scour depth of the steel cofferdam increases by 58% to 69% and 40% to 46% compared with the pile group, respectively. If the steel cofferdam is placed during the flood season, severe bottom scouring and large void areas will occur. For constructing the ultra-deep foundations in intensely scouring river sections, it is recommended to implement the scour protection firstly during the dry season, and then the placement and sinking of the cofferdam are conducted, finally the construction of bored piles is followed. The scour protection should be carried out before the flood season arrives.

Keywords: underwater foundations; local scour; numerical model; group piles; steel cofferdam

0 引言

局部冲刷已成为桥梁基础破坏主要原因之一, 在施工方案比选中作为重要的考虑因素, 其作用机理复杂, 受水流、泥沙运动及基础结构型式等因素综合影响^[1-3]。国内外学者已开展诸多研究, 例如相关成果表明局部冲刷深度随水深、流速增大而增大, 且流速作用更为明显, 同时水流入射角的变化导致局

部冲刷范围及深度变化^[4-7]。河床泥沙特性也是局部冲刷重要因素之一, 床面泥沙粒径及相关特性决定了颗粒的起动条件, 进而影响床面冲淤变化^[8-9]。此外, 水下基础结构形式改变水流泥沙运动状态, 如圆端型墩柱相对方柱及矩形柱局部冲刷深度较小^[10-12]。以上研究成果较深入地说明了局部冲刷深度与流速、水深、泥沙、基础结构等因素间的规律, 而如今随着桥梁建设技术的不断发展, 在我国长江上建造的跨江桥梁不断增多, 桥梁跨度、桥梁基础也不断增大, 桥梁基础的结构稳定性更加重要, 同时局部冲刷问题也更为突出^[13-14], 因此对于多重因素综合作用下的水下基础局部冲刷问题需进一步研究。尤

收稿日期: 2025-06-03

基金项目: 山东省重点研发计划项目(2021ZLGX04)

作者简介: 刘聪聪(1993—), 男, 硕士, 工程师, 从事水力学及河流动力学研究工作。

其对于强冲刷河段,水流条件较差,水下基础为深埋超大型结构等多因素作用下,其局部冲刷剧烈,对整体工程影响巨大,施工工艺复杂,需重点分析其冲刷特征。

本文采用数学模型及规范公式,量化群桩及钢围堰局部冲刷特征,结合工程实际情况,确定强冲刷河段超大型埋深式基础施工工艺。

1 研究对象与方法

1.1 工程概况

本研究以某千米级跨江桥梁为对象,其主墩采用高桩承台基础,位于长江主航道,依据实测资料,墩位处水下高程-12.09~10.54 m。地表覆盖层厚36~39 m,表部为松散~中密状粉细砂,厚约20 m,其下为厚约10~13 m的中密状中粗砂。承载力低,属强冲刷河段。下伏的基岩埋深在36~39 m之间,岩面平缓,厚度大,其中泥质粉砂岩及砂质泥岩为较软岩,天然极限抗压强度约12~14 MPa,砂岩为坚硬岩,饱和极限抗压强度为70 MPa,是大桥基础较好的持力层。

桥区所在河段水流受潮汐和长江径流的共同影响,最高潮位发生在汛期,最低潮位发生在枯期。流速过程呈周期性变化,涨潮时流速小,落潮时流速大;汛期流速变幅小,枯季流速变化大。由实测水文数据统计分析可知,枯水期、洪水期垂向平均最大流速分别为1.20、2.0 m/s。

主墩高桩承台基础采用超大型钻孔桩及钢围堰施工工艺施工。其中钻孔桩钢护筒直径4.4 m,护筒入土深度18 m。主墩首节钢围堰长93.30 m,宽58.80 m,高12 m,围堰总高度32.50 m(见图1)。钻孔桩及钢围堰施工计划涉及枯水期与汛期,考虑主墩基础尺寸超大型、汛期流速大、河床易冲刷等因素,本研究重点分析钻孔桩与钢围堰在不同水文条件下冲刷特征,对比分析“先桩后围堰”和“先围堰后桩”两种方案的可行性。

1.2 三维局部冲刷模型

1.2.1 模型原理

三维局部冲刷数学模型可模拟泥沙悬浮、推移、沉降等过程,基本控制方程由三维水流连续方程、动量方程、泥沙运动方程组成,并引入面积分数及体积分数^[10,17]。

基本方程为:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

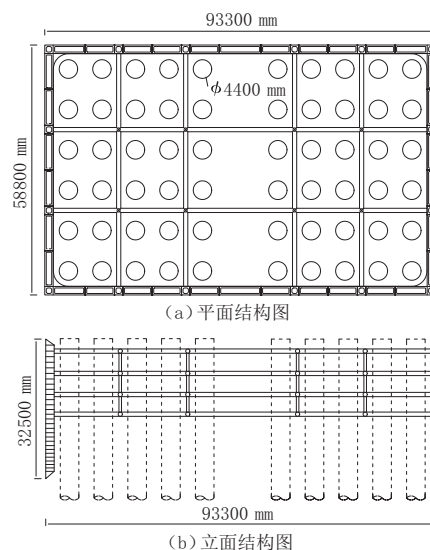


图1 钢围堰及钻孔桩结构尺寸示意图

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} + \text{div}(\rho u_i u) = \frac{\partial P}{\partial x_i} + \text{div}(\mu \text{grad} u_i) + F_i \quad (2)$$

式中: ρ 为密度,kg/cm³; P 为压强,N/m²; u_i 为局部时均流速分量,m/s; u 为速度分量,m/s; μ 为动力黏滞系数; F_i 为体积力,N。

此外,紊流模型选用改进的RNG $k - \varepsilon$ 方程,该方程通过在大尺度运动和修正后的黏度项体现小尺度的影响,能更好地计算具有剪切力的流体区域,对水流泥沙运动更为适用。泥沙起动采用希尔兹方程判别,推移质输沙率采用Meyer-Peter & Muller理论公式,悬移质对局部冲刷影响较小,暂不考虑。

其中临界Shields系数求解如下:

$$\theta_{cr,i} = \frac{0.3}{1 + 1.2d_{*,i}} + 0.055[1 - \exp(-0.02d_{*,i})] \quad (3)$$

$$d_{*,i} = d_i \left[\frac{\rho_f(\rho_f - \rho_s) \|g\|}{\mu_f^2} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (4)$$

式中: d_i 为泥沙颗粒粒径,mm; ρ_f 为流体密度,kg/cm³; ρ_s 为泥沙密度,kg/m³; μ_f 为动力黏滞系数。

模型控制方程求解采用有限差分数值方法,网格划分采用正交矩形网格,后对其偏微分方程进行时间和空间离散。

1.2.2 模型验证

模型验证采用类似项目主墩基础数据,该主墩基础沉井已进行局部冲刷物理模型试验^[15](见图2),原型沙中值粒径为0.18 mm,模型沙中值粒径为0.68 mm,泥沙起动流速比尺在9.6~11.5之间,模型沙满足泥沙起动相似要求。因此构建主墩沉井三维数学模型,依据物理模型试验结果进行数学模型验证。

类似项目主墩基础为圆端形沉井,平面尺寸



图2 物理模型试验

95.4 m×58.2 m。验证工况考虑沉井着床时,按照不同的施工时期流速分别取 1.0、1.5、2.0 m/s,水深 15.7 m,床沙中值粒径均取 0.18 mm,对比分析利用物理模型与数学模型方法计算沉井着床时附近局部冲刷情况。

由试验与数值计算最大冲刷结果(见图3)可知,沉井着床后流速 1.0、1.5、2.0 m/s 工况下,物理模型试验得到局部最大冲刷深度分别为 8.21、13.52、19.31 m,数值模拟与物理模型试验结果对比,局部最大冲刷深度相差小于 10%,表明本数学模型模拟基础局部冲刷具有较好的代表性。

2 局部冲刷分析

2.1 计算工况拟定

主墩深水基础施工工期涉及枯水期、洪水期,其水下基础的安全稳定与水位、流速变化特征密切相关。采用三维局部冲刷模型,模拟分析在流速 1.2、1.5、2.0 m/s 条件下(河段对应水位 3.0、5.0、6.5 m),分

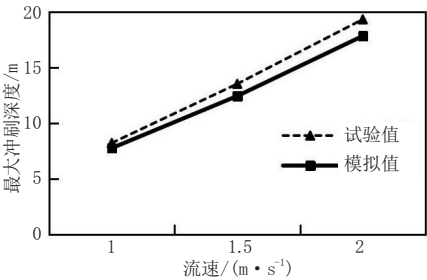


图3 数学模型验证结果图

析钻孔群桩及钢围堰局部冲刷情况,以此确定强冲刷河段超大理深式基础的施工工艺。其中针对钢围堰冲刷分析,分别包含钢围堰着床时围堰底部脱空情况及最终下沉后的最大冲刷深度。

2.2 冲刷特征分析

2.2.1 群桩与钢围堰局部冲刷深度

结合三维局部冲刷数学模型及《公路工程水文勘测设计规范》(JTG C30—2015)^[16]规范公式,分别计算水位条件下群桩及围堰局部冲刷深度。

通过调研桥梁基础局部最大冲刷情况,对比相关研究成果,统计结果见表1。由于计算原理的差别,数值计算相对规范公式计算结果更为保守,而规范公式计算结果大于冲刷实测值。

采用数学模型与经验公式两种方法计算结果见表2,钢围堰局部最大冲刷深度较群桩更大。由规范公式计算结果,钢围堰最大冲刷深度较群桩增加 58%~69%;由数学模型模拟结果,钢围堰最大冲刷深度较群桩增加 40%~46%。

表1 不同基础结构局部最大冲深计算值与实测值

工程部位	基础结构类型	尺寸/m	流速/(m·s ⁻¹)	地质条件(表层往下)	规范计算值/m	冲刷实测值/m
铜陵公铁两用长江大桥 3#墩	沉井	62×38(迎水面)×68	2.8	粉砂(8.1 m), 粉质黏土(5.6 m), 细圆砾土(21.8 m)	35.5	26.14
铜陵长江公路大桥 3#墩	双壁钢围堰	24.8(迎水面)×49.6	3.0	粉细砂(21.3 m), 砂卵石(3.36 m), 砂砾岩、胶结层(11.34 m)	34.63	20.05
池州长江公路桥 5#主墩	双壁有底钢套箱	承台 61.8×37.3(迎水面)×17; 底部桩径 3.4	2.0	松散粉细砂(13 m),中砂(18.5 m), 砾砂(1.8 m)	26.12	17.12

同时,数学模型模拟可进一步反应河床冲刷规律。针对群桩而言,受群桩阻水影响,迎水面区域壅水,流速稍有减缓,两侧由于过流断面减小,流速增大,背水侧受圆柱尾流影响,流速减小。群桩相互之间均有影响,顺流方向钻孔桩之间流速受尾流影响逐渐消减,而横向水流方向钻孔桩间受圆柱绕流影响,流速增大。流速变化直接影响床面泥沙运动,钻孔桩四周均存在冲刷,在 2.0 m/s 流速下,四周冲刷深

度 3.0 m 以内,顺流方向钻孔桩之间河床存在少量淤积,横向钻孔桩之间冲刷明显,位于迎水端前三排钻孔桩之间冲刷达到较大,最前端局部最大冲刷深度为 12.4 m,见图4(a)。针对钢围堰,其尺寸增大导致水流泥沙运动变化显著。迎水面水流同样呈现雍水及流速变化现象,两侧流速增加,尾流流速减小,而相比群桩区域而言,钢围堰区域的流速变化幅度较大,从而影响床面剧烈变化。围堰迎水面两端点处

冲刷最大,2.0 m 流速条件下局部最大冲刷深度为 17.3 m。并且冲刷向两侧扩展,形成较大冲刷坑。背水侧流场出现马蹄形漩涡,流速减小,水流挟沙能力减弱,且随着上游河床冲刷产生的泥沙向下游悬浮、推移,逐渐出现淤积,形成少量泥沙堆积体,见图 4 (b)。不同工况下局部最大冲刷深度见表 2。

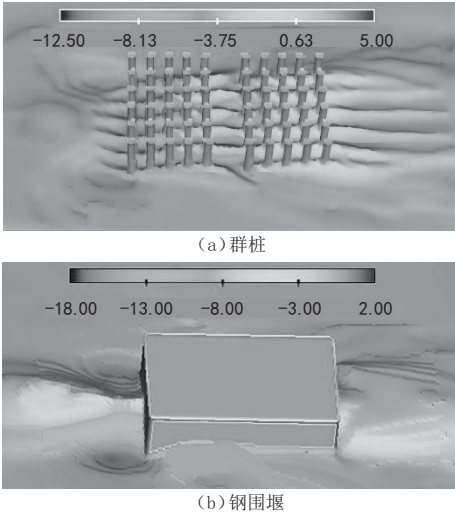


图 4 局部冲刷形态图(流速 2.0 m/s)

表 2 不同工况下局部最大冲刷深度

水位/ m	流速/ (m·s ⁻¹)	最大冲刷深度/m					
		规范公式			数学模型		
		群桩	围堰	增加率/%	群桩	围堰	增加率/%
3.0	1.2	14.1	22.3	58.16	7.2	10.5	45.83
5.0	1.5	16.2	26.4	62.96	10.1	14.2	40.59
6.5	2.0	17.9	30.2	68.72	12.4	17.3	39.52

2.2.2 钢围堰着床时底部冲刷

钢围堰着床时底部冲刷情况考虑汛期与枯期两种工况。根据数学模型结果,若考虑汛期围堰着床,流速则取 2.0 m/s,最大冲刷位于围堰迎水面两端 15 m 范围处,冲刷深度较大的范围为上游 30 m,两侧 40 m。汛期围堰底部严重脱空,仅中间部分接触泥面(方框内灰色部分表示底部未脱空,白色部分表示脱空,方框外灰色部分表示淤积),见图 5,此时围堰结构因底部脱空使得稳定性存在较大安全风险。

若考虑枯期围堰着床,流速取 1.2 m/s,冲刷范围较小。围堰底部迎水面两端角脱空,以及两侧分别约 1 m 范围产生局部冲刷脱空,其余部位均未冲刷脱空,稳定性较好。

2.3 施工工艺比选及防护措施

针对本研究中深水基础施工工艺,存在“先桩后围堰”和“先围堰后桩”2 种方案。若采用“先桩后围堰”方案,即枯水期先进行钻孔桩施工后围堰施工,

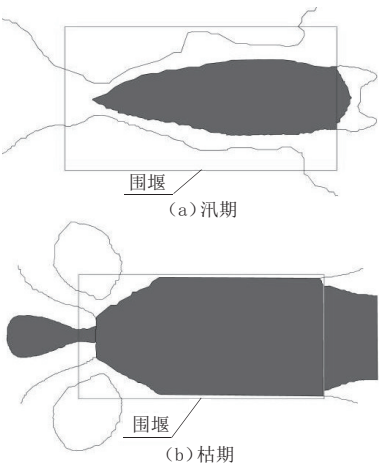


图 5 钢围堰着床时底部冲刷情况(灰色为未脱空部分)

如此首节围堰可现场大块组拼,再使用千斤顶逐节下放。但按照工序排布工期,围堰着床时间则安排在汛期,此时冲刷风险大,围堰着床时底部脱空范围较大,可能导致围堰倾斜,存在较大安全隐患。而采用“先围堰后桩”方案,根据工期安排,围堰着床时间在枯水期,冲刷深度及冲刷范围较小,风险相对低。但由于未打入钻孔桩,需注意围堰施工需设置锚墩定位,配置水上搅拌船浇筑夹壁及封底混凝土。

基于深水基础的局部冲刷数值模拟,综合安全经济等因素,建议采用“先围堰后桩”方案,同时考虑枯水期围堰冲刷风险,可采用抛石防护,依据冲刷分析结果,防护范围为围堰迎水面前端 20 m,两侧 30 m,围堰中部至尾端可无需防护。枯水期河床冲刷防护后,围堰完成着床、下沉,下沉到位后在汛期前应进行冲刷防护。

冲刷防护具体采用“砂枕层调平过渡+级配碎石层防冲+格宾网笼石保护”组合防护体系,该防护体系以深水基础为中心线分为精抛区和粗抛区,基础附近核心区为精抛区,其余为粗抛区;精抛区防护体为“砂枕层+级配碎石层+格宾网笼石”,粗抛区防护体为“砂枕层+级配碎石层+散抛块石”。该组合防护体系在基础四周以圆形或流线型方式进行防护,最底层采用聚乙烯编织袋填充中粗砂作为砂枕层,为级配碎石层提供平缓工作面,同时为河床覆盖层和防护体系之间形成柔性过渡层;中间层采用聚乙烯编织袋内填充级配碎石作为级配碎石层,为防护体系的主要结构层,防止河床泥沙及砂枕年久老化后中粗砂被河水淘走流失;最上层采用格宾网内填充块石作为格宾网笼石,起压实、固定及防止洪水冲刷作用。此种防护体系采用由下至上粒径和密度逐渐变大,与原有河床既能很好的过渡适应,也能起到基

础冲刷防护作用。

3 结 语

(1)通过规范公式计算、数学模型分析结果表明钢围堰最大冲刷深度较群桩分别增加 58%~69%, 40%~46%, 数学模型计算群桩、钢围堰汛期最大冲刷分别 12.4、17.3 m。由群桩与钢围堰冲刷规律分析可知,两者均呈现前端壅水、流速减弱,两侧流速增加,尾端流速减弱。迎水端钻孔桩之间冲刷达到最大,围堰迎水面两端角处产生最大冲刷。

(2)工程采用“先围堰后桩”方案,先对枯水期河床进行抛石防护,防护范围为围堰迎水面前端 20 m,前端至围堰中部两侧 30 m 区域,后开展围堰着床、下沉,以及钻孔桩施工,并在汛期来临前采用“砂枕层调平过渡+级配碎石层防冲+格宾网笼石保护”组合防护体系对围堰冲刷防护。

参考文献:

[1] 卢中一,高正荣,吴丽华,等.南京长江三桥桥墩基础的局部冲刷[J].人民长江,2005(10):48-50;60.
[2] Barrie A, Wang C, Liang F, et al. Experimental investigation on the mechanism of local scour around a cylindrical coastal pile foundation considering sloping bed conditions[J]. Ocean Engineering, 2024: 312.

[3] 王瑜.东海大桥桥墩过度冲刷区域防护技术研究[J].城市道桥与防洪,2022(6):171-174.
[4] 熊文,姚浩,S Caic,等.冲刷环境对桥墩冲刷空间形态影响的仿真分析[J].哈尔滨工业大学学报,2016,48(3):108-114.
[5] 张根广,吴彰松,王新雷,等.巨亭水电站下游局部冲刷三维数值模拟[J].泥沙研究,2019,44(4):12-17.
[6] 段伦良,王少华,张启博,等.三维水流作用下哑铃型围堰周围海床局部冲刷[J].西南交通大学学报,2018,53(4):704-711.
[7] 陆雪骏,程和琴,周权平,等.强潮流作用下桥墩不对称“双肾型”冲刷地貌特征与机理[J].海洋学报,2016,38(9):118-125.
[8] 王军舰,刘均儒.深水桥梁大型基础施工方案比选研究[J].城市道桥与防洪,2021(11):130-133.
[9] 隋倜倜,陈武杰,张芝永,等.贝壳砂质非均匀海床管线局部冲刷研究[J].泥沙研究,2024,49(6):66-72.
[10] 李平.水流作用下墩柱局部冲刷数值模拟研究[D].长沙:长沙理工大学,2018.
[11] 崔广永,支逸骢,董磊,等.改扩建桥梁基础围堰及桥墩冲刷分析研究[J].城市道桥与防洪,2025(1):178-181.
[12] 张凯,张程然,曹政,等.基于三维数值模拟的洪水期组合围堰结构水流作用研究[J].中外公路,2020,40(1):120-125.
[13] 张永涛,杨钊,李德杰,等.桥梁大型沉井基础建造技术发展展望[J].桥梁建设,2023,53(2):17-26.
[14] 马丽丽.跨海桥梁桩基础局部冲刷演化特征试验研究[D].杭州:浙江大学,2018.
[15] 刘聪聪,林红星,赵东梁,等.河床预开挖对围堰上游桩基局部冲刷影响研究[J].人民珠江,2021,42(5):80-85.
[16] JTG-C30—2015,公路工程水文勘测设计规范[S].

(上接第 209 页)

[12] 张静.新型透空式六面体在南汇东滩促淤二期工程中的应用[J].中国水运,2017,(11):66-68.
[13] 上海市水务局.上海市滩涂资源报告(2018年)[Z].上海:上海市水务局,2019.
[14] 王厚军,丁宁,岳奇,等.陆海统筹背景下海域综合管理探析[J].

海洋开发与管理,2021,38(1):3-7.
[15] 中交上海航道勘察设计研究有限公司,长江勘测规划设计研究有限责任公司.横沙浅滩固沙保滩稳定河势工程生态保滩护岸设计和用海工作方案[R].上海:中交上海航道勘察设计研究有限公司,长江勘测规划设计研究有限责任公司,2024.