

单排组合钢板桩在开敞式感潮河道工程中的设计和实践

于文华

(上海市堤防泵闸建设运行中心, 上海市 200080)

摘要: 针对开敞式感潮河道工程受潮汐影响显著, 施工环境复杂, 对支护结构的稳定性和防渗要求极高等技术难题, 结合黄浦江堤防维修加固工程, 对单排组合钢板桩的应用技术开展系统研究。首先论述其结构形式施工便捷、经济性好, 占地节约和环保节能等优势; 继而, 通过数值模拟分析多工况下的受力变化和位移变形; 最终, 将优化后的技术方案成功应用于工程实践。结果表明, 单排组合钢板桩能够有效满足开敞式感潮河道堤防维修实施期间基坑的稳定性与防渗性要求, 其研究成果对类似环境下的工程具有重要的参考价值 and 推广应用前景。

关键词: 单排组合钢板桩; 开敞式感潮河道; 堤防维修加固; 围堰

中图分类号: TV871.2

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2026)08-0285-04

Design and Practice of Single-row Composite Sheet Piles in Open Tidal Riverway Engineering

YU Wenhua

(Shanghai Levee and Pump Sluice Construction and Operation Center, Shanghai 200080, China)

Abstract: Aiming at the technical challenges of open tidal riverway projects significantly affected by tides, complex construction environments and extremely high requirements for the stability and anti-seepage of supporting structures, combined with the maintenance and reinforcement project of the Huangpu River embankment, a systematic study is conducted on the application technology of single-row composite steel sheet piles. Firstly, its advantages such as convenient construction, good economy, land-saving, environmental protection and energy conservation of the structures are discussed. And then, through numerical simulation, the force changes and displacement deformations under multiple constructing conditions are analyzed. Finally, the optimized technical scheme is successfully applied in engineering practice. The results show that the single-row composite steel sheet piles can effectively meet the stability and seepage prevention requirements of the foundation pit during the maintenance implementation of the open tidal riverway embankment, and the research results have important reference value and promotion prospects for the projects under the similar environments.

Keywords: single-row composite steel sheet piles; open tidal riverway; dike repair and reinforcement; cofferdam

0 引言

随着我国水利基础设施建设的不断推进, 河道堤防工程的维修加固需求日益增加。开敞式感潮河道作为一种特殊的河道类型, 受潮汐涨落影响显著, 具有水流速度多变、水位波动频繁、河床地质条件复杂等特点, 给堤防施工带来诸多挑战。

钢板桩作为一种兼具支护与防渗功能的结构形

式, 具有强度高、刚度大、抗渗性好、施工速度快等优点, 在水利、市政、港口等工程领域已得到广泛应用。单排组合钢板桩由传统钢板桩发展而来, 通过合理的组合形式, 进一步提高了结构的整体稳定性和抗渗能力, 更适用于开敞式感潮河道这类复杂的工程环境。

近年来, 国内外学者对钢板桩在水利工程中的应用进行了大量研究。朱大勇等^[1]提出了一种钢板桩围堰的安全性计算方法, 施龙华^[2]、丁红岩等^[3]对组合型钢板桩支护和钢板桩围堰进行有限元分析, Inazumi 等^[4]对钢板桩在结构基础施工中的设计进行

收稿日期: 2026-01-07

作者简介: 于文华(1984—), 女, 硕士, 高级工程师, 从事水利工程设计及管理工作。

深入研究,支彦锋等^[5]对组合型板桩支护提出了计算方法,万勇冠^[6]对工法桩围堰施工进行了研究,叶天亮等^[7]对潮汐环境条件下的围堰施工技术进行了研究,Lv G等^[8]对钢板桩施工顺序进行了数值建模与分析。在钢板桩的结构设计方面,研究人员通过数值模拟和模型试验,分析不同地质条件和荷载作用下钢板桩的受力变形规律,提出一系列优化的设计方案;针对软土地基中的钢板桩支护结构,研究入土深度、桩间距等参数对结构稳定性的影响,为工程设计提供合理的参数取值范围。

在施工技术方面,国内在钢板桩的打设设备、施工工艺等方面取得了一定的进展。新型的振动打桩机、静压打桩机等设备的应用,提高了钢板桩的打设效率和质量,减少了施工对周边环境的影响。同时,针对复杂地质条件下钢板桩的施工难题,研究人员提出预处理地层、分段施工等技术措施,保障施工的顺利进行,使得钢板桩的运用更加广泛。

但目前国内针对单排组合钢板桩在开敞式感潮河道工程中的应用研究相对较少,尤其在潮汐作用下的结构受力和位移变化方面的研究不够深入,需要进一步开展相关研究工作。

黄浦江中上游堤防防洪能力提升工程(二期)实施位于女儿泾—千步泾—徐浦大桥范围内,该段河道属于开敞式感潮河道,该工程在堤防维修加固实施中使用了单排组合钢板桩作为围堰兼临防使用,有效解决了潮汐影响下的结构受力和位移控制难题,本文主要探讨其单排组合钢板桩的设计和应用。

1 单排组合钢板桩结构特性与适用性分析

1.1 常用组合形式

组合钢板桩指由不同断面形式的板桩或钢管桩组合形成的钢板桩形式,在抗弯强度和受力性质上拥有较好的特点。常用传统钢板桩形式根据断面型式可分为U形钢板桩、Z形钢板桩以及O形钢板桩等,而由此形成的组合形式可以分为PC工法桩^[9]、

HZ/AZ组合钢板桩、箱形组合桩以及钢管桩和U形组合桩等。

1.2 性能、经济与施工技术优势

如图1所示,以PU400×170的U形、Z形、O形简单钢板桩为例^[10]。选取Q345壁厚12 mm,直径600 mm的钢管桩与各钢板桩进行组合对比^[11],其技术参数如表1所示。

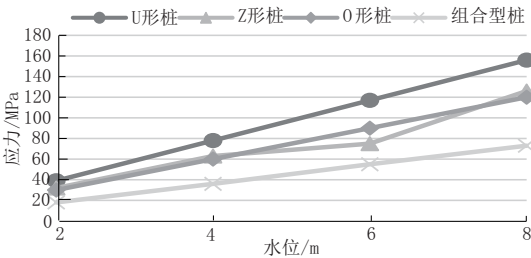


图1 不同类型钢板桩应力图

表1 不同类型钢板桩技术参数表

钢板桩类型	断面型式	截面面积/ cm ²	惯性矩/ cm ⁴	抗弯刚度/ (N·mm ²)
U形	对称U形	196.8	32 600	6.846×10 ¹³
Z形	Z形	202.5	41 200	8.652×10 ¹³
O形	闭口O形	218.3	48 500	1.018 5×10 ¹³
组合型	钢管主桩U形复桩	615.3	9.58×10 ⁸	2.012 8×10 ¹⁸

根据《港口工程荷载规范》(JTS144-1—2010)^[12]中的流水压力 F 的计算公式:

$$F_w=C_w(\rho/2)V^2A$$

$$\sigma=M_{\max}/W$$

$$P=(1/2)\gamma h^2$$

式中: F_w 为流水压力,kN; V 为水流速度,m/s; C_w 为迎水面阻水系数,取1.384; ρ 为水的密度,kg/m³; A 为水流方向上迎水面垂直面积,m²; $M_{\max}$ 为最大弯矩值; W 为截面模量; γ 为水的重度,取10 kN/m³; h 为水头高度。

由图可得,组合型桩^[13]具有桩身强度大,抗弯抗剪性能优良的优点,组合型钢板桩在水头差越大时,应力明显低于其他传统型钢板桩。

在经济与施工技术方面,不同类型钢板桩的对比如表2所示。

表2 不同类型钢板桩经济与技术对比表

钢板桩类型	抗弯刚度	造价	适用水头差	场地适应性	施工机械
U形	中等	较高	中等	适用于软土、淤泥质土层	标准振动锤
Z形	高	较高	较大	适用于软弱地基	标准振动锤
O形	高	高	有限	适用于软土、硬土,止水能力差	起重能力大的专用大型打桩设备
组合型	高	较高	深大	适用于软硬土及地质复杂区	机械主体小,可超近距离施工

综上,相较于传统钢板桩而言,组合桩具有抗弯刚度 高、水头差适用性强、场地适用区域范围最广、施工器械占地小、进场方便等优点。

2 案例的设计和 实践

2.1 潮汐特征、设计水位与波浪要素

在本次黄浦江堤防维修加固工程范围内,潮汐类型属于非正规半日潮,潮位从下游向上游逐渐降低。本段设计水位如表 2 所示,防潮标准为 1 000 年一遇,对应堤防级别为 1 级。

表 3 工程部分岸段设计水位表		单位:m
特征水位	特征水位值	
设计高水位	5.30	
设计低水位	0.86	
警戒水位	4.34	
平均高潮位	3.21	
平均低潮位	1.49	

2.2 工程地质条件

经本次勘察揭露,拟建场地沿线涉及正常地层沉积区和古河道沉积区,在深度 75.0 m 范围内地基土属第四纪上更新世及全新世沉积物,主要由黏性土、粉性土和砂土组成,分布较稳定,一般具有成层分布的特点。本工程范围土层分布以及物理力学参数如表 3 所示。

表 4 地勘土体参数表				
层号	土层名称	重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$
① ₁₋₁	杂填土	18.0	—	—
① ₁₋₂	素填土	18.0	8	8.0
① ₃	黏质粉土夹粉质黏土	18.6	5	20.0
②	粉质黏土	18.4	20	14.5
③	淤泥质粉质黏土	17.4	10.5	15.0
③ _j	黏质粉土	—	—	—
④ ₁	淤泥质黏土	16.4	12	9.0
④ ₂	粉砂	18.5	3	30.0
⑤ ₁	粉质黏土	17.9	14	15.0
⑤ ₂	粉砂	18.7	3	31.7
⑤ ₃₋₁	粉质黏土	18.2	15.5	17.7
⑤ ₃₋₂	黏质粉土夹粉质黏土	—	—	—
⑥	粉质黏土	19.6	40	12.0

2.3 设计方案

该工程汛期围堰标准断面如图 2 所示,采用围堰兼做临防的形式,采用 PU400 mm×170 mm 钢板桩,桩长 15 ~ 17 m,桩顶标高为 5.24 ~ 6.00 m,设计高水位为 4.30 ~ 5.20 m,前后排桩间距为 4 m,围堰使用 $\phi 28$ 对拉钢筋。

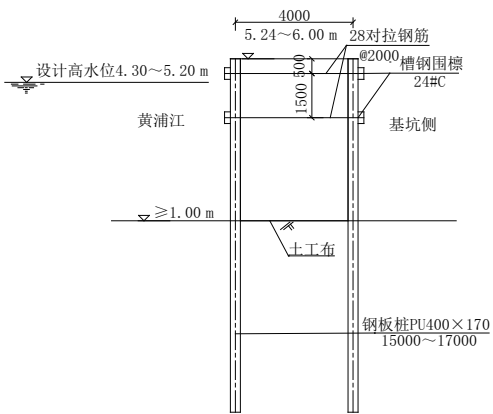


图 2 汛期围堰标准结构图(单位:mm)

围堰标准做法在水利工程中多有运用,但对用地条件较高,需要占用一定的河道宽度,且中间需先外购黏性土回填,围堰拆除后需要将土方外运消纳。

考虑以上岸段的实际施工需求,本工程拟将围堰进行优化,采用单排组合钢板桩围堰如图 3 所示,采用钢板桩和钢管桩组合型式,钢板桩采用 U 形钢板桩(PU400 mm×170 mm),钢管桩采用 Q345 直径 600 mm,壁厚 12 mm,桩长 15 m,桩顶标高为 5.24 ~ 6.00 m,设计高水位为 4.30 ~ 5.20 m,如图 4 所示。桩后基坑侧设置袋装土围堰交错堆筑,围堰顶标高 5.24~6.00 m,顶宽 1.0 m。

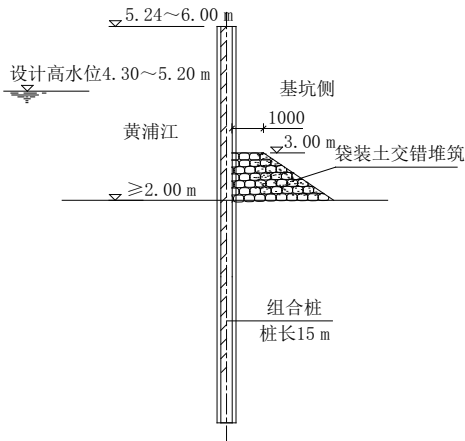


图 3 单排组合桩围堰结构图(单位:mm)

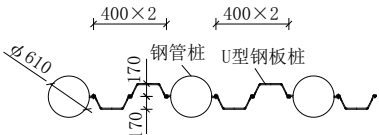


图 4 单排组合桩围堰结构示意图(单位:mm)

2.4 变形与内力计算

以工程单排组合钢板桩结构为例,通过建立单排组合钢板桩围堰数值模型,考虑施工环境中的感潮河道的水位变化,模拟出围堰在设计高水位、设计低水位、平均高水位、平均低水位等不同水位情况下的受力过程,利用罗朝华等^[14]总结出的 Morison 方程

修正系数公式计算,分析其弯矩及剪力的分布情况^[15],根据Plaxis有限元软件进行受力分析,计算出最大应力及产生的位移情况如表4和图5及图6所示。

表5 不同工况水位下钢板桩受力与位移计算表

工况顺序	主要内容	钢板桩最大应力/MPa	对钢板桩产生的最大位移/mm	变形方向
工况一	处于设计高水位+5.30 m处时	125.187	7.56	向背水侧
工况二	处于平均高水位+3.21 m处时	54.51	4.41	向背水侧
工况三	处于平均低水位+1.49 m处时	25.30	1.47	向迎水侧
工况四	处于设计低水位+0.86 m处时	10.11	2.28	向迎水侧

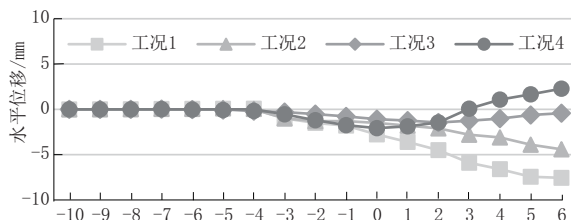


图5 各工况位移曲线图

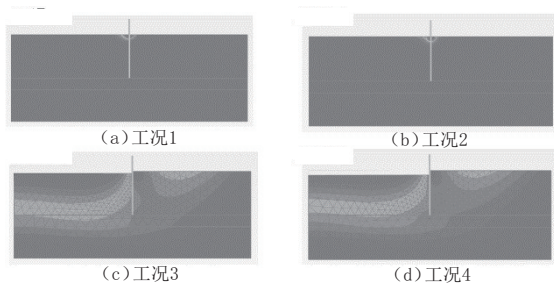


图6 各工况影响云图

结果显示,在不同水位变化下,钢板桩的水平位移模式变化明显。

在设计高水位和平均高水位工况下,围堰内部泥面线保持现状不变,钢板桩的水平位移明显趋向于背水面方向,分别为7.56 mm和4.41 mm。

而在平均低水位和设计低水位工况下,位移则呈现先增大后减小的“中间鼓肚”趋势,最大值出现在河道泥面线 and 设计水位之间,最终桩顶位移方向趋向于迎水面方向,分别为1.47 mm和2.28 mm。

以上结果显示,在开敞式的感潮河道中,单排组合钢板桩作为围堰兼临防使用时,其受力结构和位移均能满足规范要求。

2.5 止水措施

单排组合钢板桩整体刚度大、占地小、施工快捷,通过采取有效止水措施,可提升整体防渗可靠性。在技术措施方面,通过锁口强化、防渗补强和变

形控制等措施,可降低单排组合桩变形引发的渗漏风险。根据工程实际情况,可选用高密封型锁口型式,并在打桩前在锁口槽内连续填充专用锁口止水胶条,遇水膨胀后自动填充锁口间隙,形成咬合深度大、间隙小,变形后仍能保持一定贴合度的效果,从而替代浅咬合普通锁口,达到密封目的;设置型钢导向架、整体导向围檩,严格控制桩位及垂直度,避免倾斜造成锁口局部撕裂、张开。在围堰外侧沿锁口轴线抛填黏土,形成水下防渗帷幕,可等效替代双排桩间黏土止水的作用;围堰内侧抽水后,对锁口缝隙采用嵌缝密封胶进行封堵,形成连续密封面层。

在管理措施方面,施工期与运行期需持续监测围堰位移、沉降、锁口张开量、渗水量,实施观测渗漏情况,判断锁口状态。若发生轻微渗漏,可在内侧锁口灌注膨润土浆液,水下自行凝固封堵;若发生集中渗漏,外侧抛填碎石反滤料和袋装黏土,内侧采用快硬水泥进行包裹封堵。

2.6 工程中的实际应用

工程范围内黄浦江某支流,河口宽约30 m,规划为6级航道,且往来船只较多,防汛墙后方用地条件限制,防汛通道后方即为居民小区。基于最大限度减少航道占用及规避市区土方转运难题的考虑,该段防汛墙改造现场采用单排组合钢板桩构筑围堰。其优势在于结构紧凑、施工便捷,能够原地形成封闭的挡水体系,避免大规模土方工程带来的成本与环境问题。

目前该项目已经顺利实施,经现场验证(见图7),单排组合钢板桩也能满足开敞式感潮河道不同水下变化下的受力和位移变化的要求。



图7 现场组合桩实景运用照片

3 结 语

本文以黄浦江堤防维修加固工程为背景,针对开敞式感潮河道面临的潮汐作用显著、施工环境复杂、结构要求严苛等挑战,重点开展了在这一特殊水

(下转第319页)