一种利用既有桩基加固的“T 形”护岸结构在航道升级中应用分析*

洪晶晶[1]，郑国诞[2]

（1. 浙江数智交院科技股份有限公司，浙江 杭州 310030；
2. 浙江省水利河口研究院（浙江省海洋规划设计研究院），浙江 杭州 310020）

摘要：针对内河限制性航道等级提升后原护岸结构不满足相关标准要求的情况，研究现状桩基加固护岸升级改造形式。结合既有桩基受力性能、挡墙墙身整体性等情况，提出一种利用既有桩基与新建桩基形成“T 形”组合桩结构再次加固护岸的方法，通过在老挡墙后方间断设置基桩，将原单排桩受力体系转化为间隔的“门架”体系，优化桩基受力、减小桩基变形，满足结构要求。针对典型工程，利用 PLAXIS 3D 有限元软件对再次加固护岸结构桩前土体开挖过程进行数值模拟，分析桩基变形、内力等特点。计算结果表明：再次加固护岸结构安全系数提升约 21%，既有桩基桩身弯矩分布更为均匀，弯矩峰值减少约 23%，桩顶位移减少约 58%，满足相关标准要求。同时，再次加固护岸不占用航道水域、不新增用地，具有较好的可行性与适宜性，可为类似航道升级工程提供参考。

关键词：航道升级；护岸结构；既有桩基；组合桩；数值模拟
中图分类号：U612.3　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1002-4972(2026)07-0144-06

Application analysis of a “T-shaped” revetment structure reinforced by existing pile foundations in waterway upgrading

HONG Jingjing[1], ZHENG Guodan[2]

(1. Zhejiang Institute of Communications Co., Ltd., Hangzhou 310030, China;
2. Zhejiang Institute of Hydraulics & Estuary(Zhejiang Institute of Marine Planning and Design), Hangzhou 310020, China)

Abstract: In view of the situation where the original revetment structures fail to meet the requirements of relevant standards after the upgrading of inland restricted waterways, this paper studies the current renovation and reinforcement types of revetments using existing pile foundations. Considering the mechanical performance of existing pile foundations and the integrity of retaining wall structures, an approach is proposed to reinforce the revetment again by forming a “T-shaped” composite pile structure with existing and newly-built piles. By arranging foundation piles intermittently behind the original retaining wall, the original single-row pile force-bearing system is transformed into a spaced “portal frame” system, which optimizes the stress on pile foundations, reduces the deformation of the pile foundations, and meets structural requirements. For a typical project, the PLAXIS 3D finite element software is used to conduct numerical simulation of the soil excavation process in front of the piles of the re-reinforced revetment structure, and the characteristics such as pile foundation deformation and internal force are analyzed. The calculation results show that the safety factor of the re-reinforced revetment structure is increased by about 21%, the bending moment distribution of existing pile foundations is more uniform, the peak bending moment is reduced by about 23%, and the pile top displacement is decreased by about 58%, all of which satisfy the relevant standard requirements. Meanwhile, the re-reinforced revetment does not occupy waterway areas or require additional land, demonstrating good feasibility and applicability. This study can provide a reference for similar waterway upgrading projects.

Keywords: waterway upgrading; revetment structure; existing pile foundation; composite pile; numerical simulation

收稿日期：2025-11-25　　**录用日期：**2026-01-23
***基金项目：**浙江省交通运输厅课题项目(2022-GCKY-12)

作者简介：洪晶晶(1986—)，男，硕士，正高级工程师，从事港航工程规划及设计工作。

水运工程

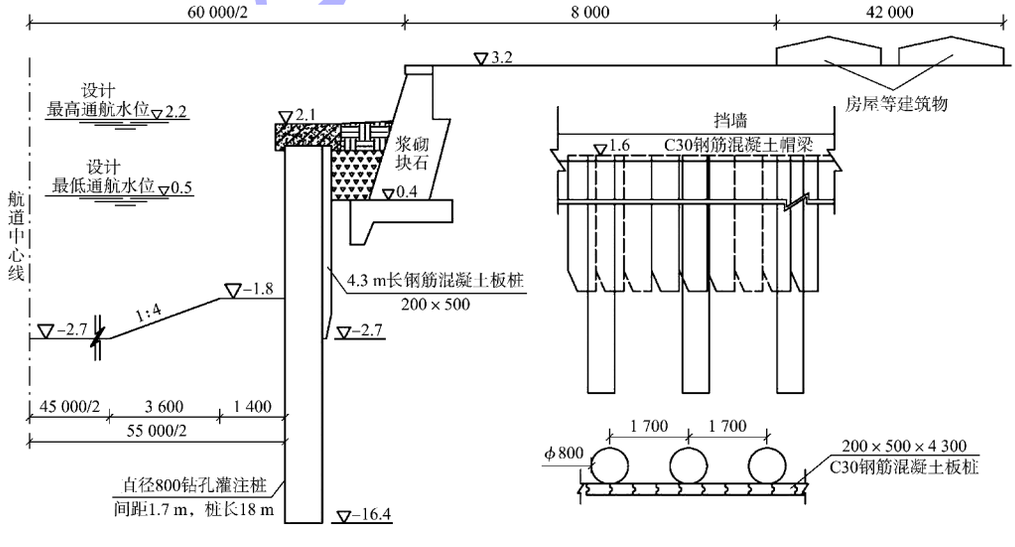
随着长三角地区航道一体化快速发展及运输结构的调整，浙江内河水运货运量快速增加，船舶大型化趋势明显，迫切需要航道扩能提级，提升航道资源利用效率。近些年浙江限制性航道整治中受土地资源制约，护岸以利用老挡墙的桩基加固护岸为主。随着航道扩能提级，针对该类护岸在尽可能不征地、少征迁、少占水域条件下，如何进一步升级改造，亟须研究创新护岸建设技术，以破解当前护岸改造面临的难题，有效提升内河航道的建设质量和节约投资，助力交通强国目标早日实现。

目前利用老挡墙的桩基加固护岸主要是在老挡墙临水侧打设单排桩基，使其与老挡墙形成整体受力结构[1]。根据护岸后方建筑物及荷载条件，桩基主要分为钢板桩、预制混凝土板桩等挤土桩和钻孔灌注桩等非挤土桩。航道升级后由于桩前泥面疏浚，现有桩基内力和顶部位移将可能不满足相关标准要求，而根据现有施工条件及工艺，除了钢板桩外，预制混凝土板桩和钻孔灌注桩较难拔除。因此考虑利用既有桩基并在岸侧增加工程措施，将单排桩受力体系转换为双排桩或组合桩受力体系，减少桩顶位移，并满足结构要求。近年来，由前排桩、后排桩及连系梁组成的双排桩结构，因其具有较大的整体侧向刚度，可有效减少支护结构变形，在基坑支护工程中得到了广泛应用[2-4]；沈孔成等[5]以等效刚度法为理论基础，对双排桩河道护岸结构性状及主要影响因素进行了分析；杨志荣[6]针对具体工程案例，通过有限元数值模型分析了河道护岸双排桩桩长、桩距的合理取值。目前研究主要针对单排桩加固护岸[7-10]或双排桩基坑支护结构、新建护岸受力机制等方面展开，对利用既有桩基与新建工程措施组合结构再次加固护岸研究较少。

本文以航道沿线房屋密集段灌注桩结合短板桩加老挡墙加固护岸为例，通过老挡墙后方间断设置基桩与既有桩基形成“T 形”组合桩结构，将原单排桩受力体系转化为间隔的“门架”体系对护岸进行再次加固，并通过 PLAXIS 3D 有限元软件数值模拟分析了加固护岸稳定性，为类似航道升级工程提供参考，推动航道建设水平的不断提升与发展。

1　工程概况

某段航道现状等级为限制性三级航道，航道面宽 60 m，护岸后方 8～50 m 存在两层房屋。护岸挡墙为原四级航道建设的浆砌块石挡墙，墙前在三级航道整治时采用钻孔灌注桩加混凝土短板桩结构。挡墙顶高程 3.2 m(1985 国家高程基准)，C30 钻孔灌注桩直径 0.8 m、间距 1.7 m、桩长 18 m、抗弯承载力 800 kN·m。灌注桩后方为连续钢筋混凝土止土板桩，板桩长 4.3 m、宽 0.5 m、厚度 0.2 m，底高程为−2.7 m。现状护岸结构见图 1。



a) 护岸结构　　b) 护岸桩位

图 1　现状护岸结构(尺寸：mm；高程：m)

Fig. 1　Current revetment structure(dimension:mm; elevation:m)

现状三级航道升级为二级航道(底宽 55 m)后，既有桩基前沿泥面底高程由−1.8 m 降至−4.0 m，低于现有止土板桩底高程，存在漏土问题，需进行止土处理；既有加固护岸桩基顶部变形不满足 30 mm 控制指标要求[11]，需采取工程措施满足结构变形要求。

2　数值模型建立

2.1　提升护岸结构方案

为减少提升护岸结构及施工对过往船舶通航安全的影响，该方案不考虑占用航道水域。提升护岸设计利用既有加固桩基结构，并间断保留老挡墙，在老挡墙后方新建非挤土桩与既有灌注桩组合成“T 形”结构，承受墙后土体引起的水平土压力荷载。现状窄空间环境下，为了解决既有板桩前存在漏土的问题，在既有板桩与老挡墙之间再密排打设占用空间较小的直线形冷弯锁扣钢板桩(CRP-X，宽 600 mm、高 60 mm、厚 8 mm)进行止土，桩长 7.0 m，桩底高程−5.4 m。

根据现状地质与荷载条件计算，新建非挤土桩采用直径 0.8 m 钻孔灌注桩间断布置，每 10 m 中设 2 根，灌注桩桩长 14 m，桩底高程−12.4 m。2 根灌注桩组成的 5 m 结构段对应老挡墙上部墙身拆除后，在 C30 钢筋混凝土连梁上方同步现浇小挡墙，墙顶高程 3.2 m，连梁顶高程 2.1 m、厚 0.6 m。

提升护岸利用既有桩基结构并保留老挡墙约 80%，在老挡墙后方新建桩基不涉及新增用地，有效节约土地资源。提升护岸结构见图 2。

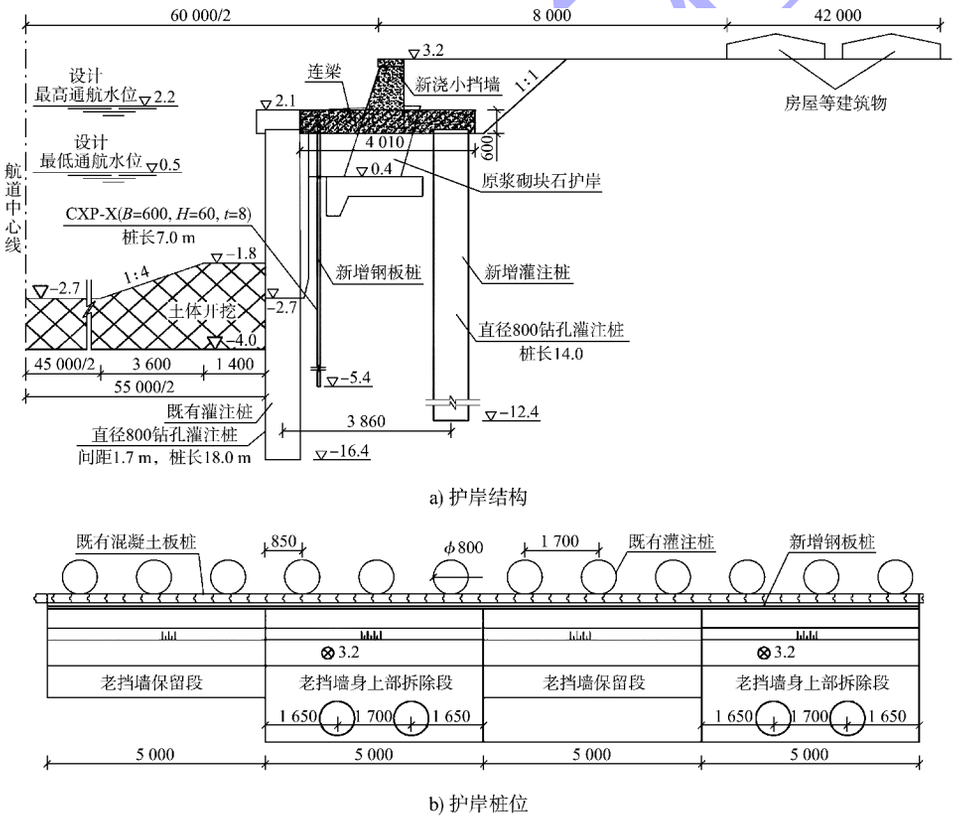


图 2　提升护岸结构(尺寸：mm；高程：m)

Fig. 2　Upgraded the revetment structure(dimension:mm; elevation:m)

2.2　计算模型

结合垂直护岸联合后排间断布置桩，将既有灌注桩护岸和新增钢板桩考虑为前排垂直护岸，后排设置单桩。计算模型中老挡墙按实体考虑，既有及新增灌注桩直径均为 0.8 m，既有灌注桩长度 18 m，新增灌注桩长度 14 m，连梁采用高 0.6 m、宽 5.0 m 的钢筋混凝土。首先在 Plaxis 有限元软件中建立三维有限元计算模型，见图 3。

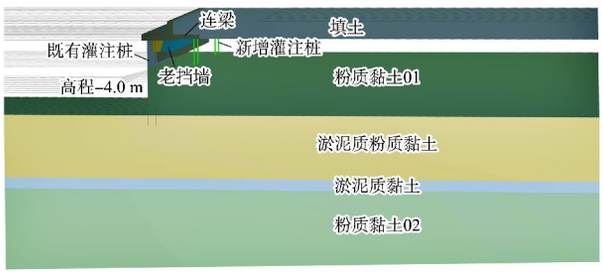


图 3　三维有限元计算模型

Fig. 3　Three-dimensional finite element calculation model

土体硬化本构模型(HS 模型)适用于基坑开挖的数值分析，它能得到较合理的围护桩(墙)位移、支护结构内力[12]。本文对于粉质黏土、淤泥质粉质黏土、淤泥质黏土、黏土，采用 Schanz 等[13]提出的 HS 模型进行分析。老挡墙、前后排桩钢筋混凝土连梁均采用线弹性模型模拟。钢板桩采用板单元模拟，既有及新增灌注桩均采用 embedded pile 单元模拟，挡墙、桩与土体之间相互作用通过界面单元模拟。土体及结构参数见表 1。

表 1　土体及结构参数

Tab. 1　Soil and structural parameters

类别	层厚/m	重力密度/(kN·m^{-3})	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	泊松比	割线模量/MPa	切线压缩模量/MPa	卸载-再加载模量/MPa	模量应力相关幂指数	渗透系数/(m·d^{-1})	界面强度折减因子	抗弯刚度/(kN·m)	刚度/(kN·m)
填土	3.7	18.5	10	25.0	0.20	21.0	21.0	63.0	0.85	0.100 0	0.70	–	–
粉质黏土 01	4.0	19.0	32	20.0	0.20	14.1	14.1	42.3	0.90	0.004 0	0.67	–	–
淤泥质粉质黏土	5.2	18.2	15	16.0	0.20	9.0	9.0	27.0	0.90	0.000 4	0.67	–	–
淤泥质黏土	0.9	17.0	16	15.0	0.20	7.5	7.5	22.5	0.89	0.000 3	0.67	–	–
粉质黏土 02	8.1	19.4	48	20.2	0.20	18.0	18.0	54.0	0.90	0.004 0	0.67	–	–
粉质黏土 03	3.4	18.6	35	18.9	0.20	18.5	18.5	55.5	0.90	0.004 0	0.67	–	–
粉质黏土 04	4.9	18.9	48	20.6	0.20	17.9	17.9	53.7	0.90	0.004 0	0.67	–	–
黏土	13.0	18.6	21	16.0	0.20	10.0	10.0	30.0	0.90	0.000 1	0.67	–	–
钢板桩	–	78.5	–	–	0.25	–	–	–	–	–	–	672	–
灌注桩	–	25.0	–	–	0.20	–	–	–	–	–	–	6×10^5	–
老挡墙	–	20.0	–	–	0.20	–	–	–	–	–	–	–	3×10^6

2.3　计算工况

按照计划施工工序设置计算工况，见表 2。计算时，首先初始地应力平衡，待输入荷载后开始桩基结构施工及土方开挖模拟。

表 2　计算步设计工况

Tab. 2　Calculation step design conditions

施工工况	类别	内容
1	加载	输入房屋荷载
2	桩基结构	新增钢板桩、灌注桩施工
3	土体开挖	既有桩前土体开挖从高程-1.8 降至-4.0 m

分析过程对老挡墙后方房屋荷载进行了简化，两层房屋采用 30 kPa 均布荷载。老挡墙前水位取不利工况水位 0.5 m。墙后地下水位随着距老挡墙距离的增加，地下水位线逐渐升高，距挡墙较远处的地下水位保持初始状态。

3　计算结果分析

通过三维模型的数值分析计算，现状航道护岸既有桩基前沿泥面高程由-1.8 m 降至-4.0 m 后，护岸结构安全系数为 1.69，满足规范规定的安全系数；既有灌注桩最大弯矩为 643.5 kN·m，约达到基桩抗弯承载力的 80%；既有桩基顶部水平位移为 68.8 mm，超出了 30 mm 的控制指标要求。在利用既有桩基的基础上，通过在老挡墙后方增设间断灌注桩后，既有桩基顶部水平位移为 28.7 mm，满足 30 mm 的控制指标要求；既有灌注桩最大弯矩为 498.6 kN·m，约达到基桩抗弯承载力的 62%；同时，护岸结构安全系数进一步提高到 2.05。不同工况结构计算主要成果见表 3。

水运工程

表 3　不同工况结构计算主要成果

Tab. 3　Main results of structural calculations under different working conditions

工况	前排桩最大水平位移/mm	前排桩峰值弯矩/(kN·m)		后排桩最大水平位移/mm	后排桩峰值弯矩/(kN·m)		安全系数
		正弯矩	负弯矩		正弯矩	负弯矩	
土体开挖至高程-4.0 m,后排桩施工前	68.8	643.5	-29.1	-	-	-	1.69
土体开挖至高程-4.0 m,后排桩施工后	28.7	498.6	-292.3	28.7	43.8	-99.7	2.05

现状航道护岸既有桩基前沿泥面高程由-1.8 m降至-4.0 m后，后排桩基实施前、后护岸结构安全系数对比曲线见图 4。

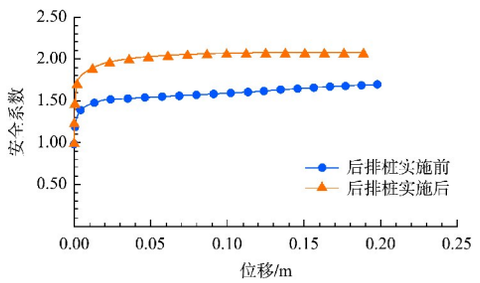


图 4　土体开挖至高程-4.0 m 后护岸结构安全系数曲线

Fig. 4　Safety factor curve of revetment structure after soil excavation to elevation-4.0 m

既有桩前土体开挖至底部(高程-4.0 m)条件下，后排桩基实施前、后既有前排桩桩身范围内水平位移对比曲线见图 5。

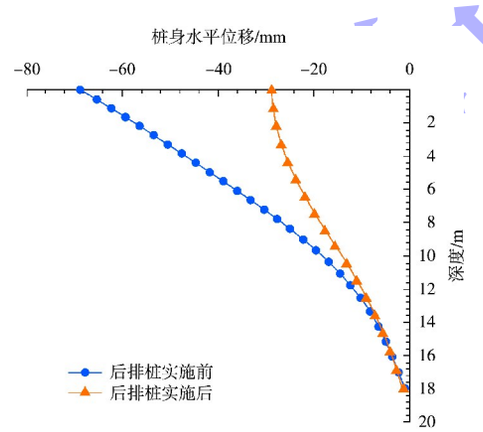


图 5　既有前排桩桩身水平位移

Fig. 5　Horizontal displacement of the existing front row pile shaft

由图 5 可知，后排桩基实施前，悬臂单排桩水平位移呈现顶部大、底部小特点，桩基顶部位移最大达到 68.8 mm。增加后排桩后，受连系梁的约束作用，桩身变形曲率从桩底至桩顶有不断减小的趋势，桩基顶部位移减小到 28.7 mm，满足小于 30 mm 控制指标的要求。上述变形规律与万智[14]关于考虑空间效应的双排桩支护结构体系的分析一致。说明在利用既有桩基的基础上，通过新增后排桩基的工程措施达到了减小位移控制变形的目的。

既有桩前土体开挖至底部(高程-4.0 m)条件下，后排桩基实施前、后既有前排桩桩身范围内弯矩对比曲线见图 6。

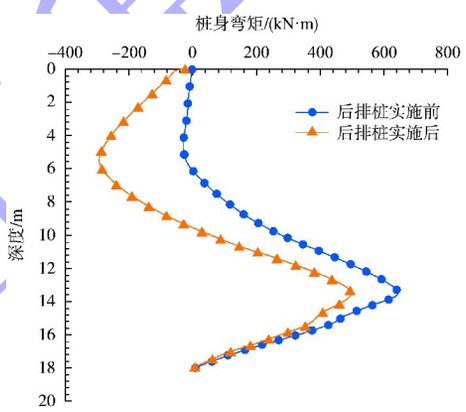


图 6　既有前排桩桩身弯矩

Fig. 6　Bending moment of the existing front row pile shaft

由图 6 可知，后排桩基实施前，悬臂单排桩在泥面以上的弯矩非常小，在出现反弯点后，弯矩逐渐增长，直至峰值 643.5 kN·m 后又逐渐减小。增加后排桩后，前排桩桩身所受弯矩呈 S 形，主要由于连系梁的存在，将前排桩内力向后排桩转移，使得桩身弯矩的分布更加均匀，弯矩峰值也相应减小至 498.6 kN·m，减少约 23%。上述规律与史海莹[15]关于双排桩支护结构性状研究中的分析一致。说明在利用既有桩基的基础上，通过新增后排桩基的工程措施满足原设计强度的同时，进一步优化了结构受力体系。

4　结语

1）针对现状桩基加固护岸升级改造形式，本文提出一种利用既有桩基与新建桩基形成“T 形”

组合桩结构再次加固护岸，通过老挡墙后方间断设置基桩，将原单排桩受力体系转化为间隔的“门架”体系，优化桩基受力、减小桩基变形，满足结构要求。

2）针对既有止土板桩不能满足航道升级后防漏土的问题，本文提出在窄空间环境下，采用不侵占航道水域，且具备良好可靠性、耐久性、适宜性的直线型锁扣钢板桩，实现有效止土。

3）既有桩基联合后排间断布置桩的加固结构，需以既有桩基质量可靠为前提，在实际工程中应根据既有桩基的运营情况，利用数值模拟结果，结合基桩检测分析综合确定。

参考文献：

[1] 徐飞. 老护岸加固在京杭运河特殊航段的应用分析[J]. 中国水运, 2024, 24(6): 65-66, 96.
XU F. Application analysis of old revetment reinforcement in special sections of Beijing-Hangzhou Canal[J]. China water transport, 2024, 24(6): 65-66, 96.

[2] 应宏伟, 初振环, 李冰河, 等. 双排桩支护结构的计算方法研究及工程应用[J]. 岩土力学, 2007, 28(6): 1145-1150.
YING H W, CHU Z H, LI B H, et al. Study on calculation method of retaining structure with double-row piles and its application[J]. Rock and soil mechanics, 2007, 28(6): 1145-1150.

[3] 高阳, 孙浩凯, 刘日成. 基坑的双排桩支护设计及变形规律[J]. 山东大学学报(工学版), 2019, 49(3): 86-94.
GAO Y, SUN H K, LIU R C. Slope deformation and parameters sensitivity in the design of double-row supporting piles[J]. Journal of Shandong University (engineering science), 2019, 49(3): 86-94.

[4] 张京, 李大华, 王鑫, 等. 双排桩在深基坑工程中的应用与分析[J]. 齐齐哈尔大学学报(自然科学版), 2021, 37(4): 76-84.
ZHANG J, LI D H, WANG X, et al. Application and analysis of double row piles in deep foundation pit engineering[J]. Journal of Qiqihar University (natural science edition), 2021, 37(4): 76-84.

[5] 沈孔成, 郑德喜, 刘圣饶, 等. 双排桩河道护岸结构性状分析及优化设计[J]. 中国农村水利水电, 2014(7): 139-142.
SHEN K C, ZHENG D X, LIU S R, et al. Analysis and optimization design of structural characteristics of double-row pile revetment protection[J]. China rural water and hydropower, 2014(7): 139-142.

[6] 杨志荣. 双排桩在河道护岸加固中的应用[J]. 水利科技与经济, 2025, 31(12): 132-136.
YANG Z R. Application of double-row piles in river revetment reinforcement[J]. Water conservancy science and technology and economy, 2025, 31(12): 132-136.

[7] 田丽英. 灌注桩结合短板桩技术在内河航道护岸加固中的应用[J]. 中国水运(下半月), 2019(12): 117-118.
TIAN L Y. Application of cast-in-place pile combined with short-board pile technology in revetment reinforcement of inland waterway[J]. China water transport(the second half of the month), 2019(12): 117-118.

[8] 张健, 杨立功, 张宇亭, 等. 钢板桩加固岸坡变形与桩土相互作用机理研究[J]. 岩土工程学报, 2024, 46(S1): 202-206.
ZHANG J, YANG L G, ZHANG Y T, et al. Deformation and pile-soil interaction mechanism of bank slopes reinforced by steel sheet piles[J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2024, 46(S1): 202-206.

[9] 王新泉, 陈永辉, 章宇强, 等. 板桩加固护岸受力机制的现场试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(6): 1749-1756.
WANG X Q, CHEN Y H, ZHANG Y Q, et al. Field experimental study of stress mechanism of sheet pile reinforced revetment[J]. Rock and soil mechanics, 2011, 32(6): 1749-1756.

[10] 许春虎, 陈永辉, 石刚传. 加固护岸板桩土压力计算模型研究[J]. 水电能源科学, 2016, 34(9): 157-160, 130.
XU C H, CHEN Y H, SHI G C. Study on earth pressure model of sheet pile for reinforcing revetment[J]. Water resources and power, 2016, 34(9): 157-160, 130.

(下转第 210 页)

水运工程