内河大水位差高桩码头系靠平台结构设计优化

王　全[1,2]，禹精瑞[1,2]，陈　哲[1,2]

（1. 中交武汉港湾工程设计研究院有限公司，湖北 武汉，430040；
2. 海工结构新材料及维护加固技术湖北省重点实验室，湖北 武汉，430040）

摘要：高桩码头可通过设置多级系缆平台的方式适应内河大水位差的特点，通常系缆平台常采用钢结构。针对钢结构易腐蚀、建设及维护费用较高的问题，以高桩码头系靠平台结构为研究对象，进行了钢结构以及优化混凝土结构的对比研究。采用有限元分析软件进行三维建模，分析横梁、桩基的受力情况，并对比两种结构的投资。结果表明：采用优化混凝土结构可增加码头平台前沿系靠结构的整体性，有效降低桩基最大弯矩，使结构更为有利，但横梁弯矩、剪力均有一定程度的增加。优化混凝土结构可明显降低工程造价，减少后期维护工作。

关键词：高桩码头；大水位差；系靠平台结构；有限元

中图分类号：U656. 1+13；TU437　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1002-4972(2025)05-0049-06

Optimization of structural design of mooring platform for high-piled wharf with large water level difference in inland river

WANG Quan[1,2], YU Jingrui[1,2], CHEN Zhe[1,2]

(1. CCCC Wuhan Harbour Engineering Design & Research Co., Ltd., Wuhan 430040, China;
2. Hubei Key Laboratory of Advanced Materials & Reinforcement Technology Research for Marine Environment Structures, Wuhan 430040, China)

Abstract: The high-piled wharf can accommodate the feature of large water level differences in inland rivers by establishing multiple levels of mooring platforms, which usually adopts steel structures. To the problems of susceptibility to corrosion and high construction and maintenance costs of steel structures, this paper takes the mooring platform structure of the high-piled wharf as the research object and conducts a comparative study of steel structures and optimized concrete structures. By using finite element analysis software for three-dimensional modeling, the stress conditions of the beams and pile foundations are analyzed, and the investments of the two structures are compared. The results show that the optimized concrete structures can increase the integrity of the mooring structure at the front edge of the wharf platform, effectively reduce the maximum bending moment of the pile foundations, and the structure is more favorable. However, the bending moment and shear force of the beams have increased to a certain extent. The optimized concrete structure can significantly lower the project cost and reduce the subsequent maintenance efforts.

Keywords: high-piled wharf; large water level difference; mooring platform structure; finite element

我国河流众多，水资源丰富，在我国交通运输行业中起着不可或缺的作用。内河河流常由于季节性影响，表现出水位落差大的特点[1]。高桩码头可设置多级系缆平台，能够很好地适应大水

收稿日期：2024-07-24

作者简介：王全（1982—），男，硕士，高级工程师，从事港口、航道工程咨询与设计工作。

水运工程

位差的变化，对穿行水流影响小，装卸效率高，通过能力大，广泛应用于内河码头[2-4]。高桩码头不仅要承受由风、水流引起的环境荷载，还要承受船舶撞击荷载与码头地面使用荷载等复杂工作荷载[5]。龙友立[6]对内河大水位差高桩码头的船舶靠泊进行了受力分析，揭示了不同构件位移以及弯矩的分布规律；诸云鹏[7]等对大水位差高桩框架码头结构进行了优化，结果表明采用竖向斜撑能够减少结构的变形及应力，增加结构的整体稳定性。规范中明确设置多层系靠船结构梁板式码头的基桩宜采用钢管桩，系靠船结构宜采用钢结构[8]。钢结构的强度大，具有较强的抗弯能力，但长期以来存在着腐蚀问题，尤其位于潮湿环境中更易腐蚀，进而导致钢结构截面削弱，存在结构安全隐患[9-10]。本文以荆州港某综合码头项目为例，利用有限元分析软件建立码头计算模型，进行虚拟仿真分析，对内河大水位差高桩码头系靠平台结构设计优化进行研究，对比结构受力，阐明其经济效益，为同类型的高桩码头设计提供研究基础以及理论依据。

1　工程概况

工程位于湖北省荆州市长江朱家湾河段，紧傍公安县城开发区。工程采用高桩梁板结构，平台尺度为 333 m×28 m，码头面高程 40.81 m，排架间距 8 m；设计高水位为 40.31 m，设计低水位为 26.87 m，水位差为 13.44 m，为满足船舶在不同水位时系靠码头，设 2 层系靠平台。总平面布置见图 1。本文主要以码头平台为研究对象，对高桩码头系靠平台结构设计进行优化分析。

在勘探深度(40.0 m)范围内，工程场地所分布的地层除表层杂填土层(Q^{ml})外，其下均为第四系全新统冲洪积成因的(Q_4^{al+pl})粉质黏土、粉砂及砂卵石，地质剖面见图 2。各地层预应力管桩桩基设计参数见表 1。

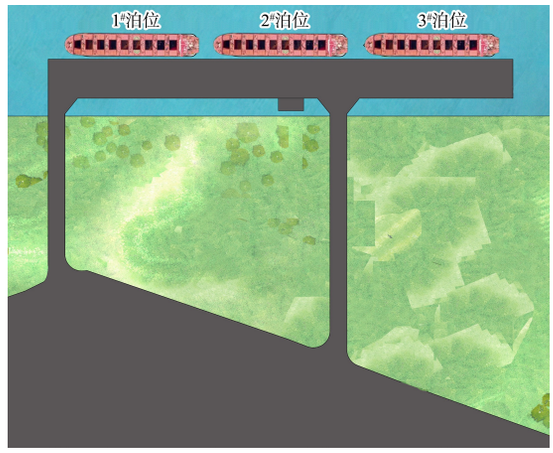


图 1　总平面布置

Fig. 1　General plan layout

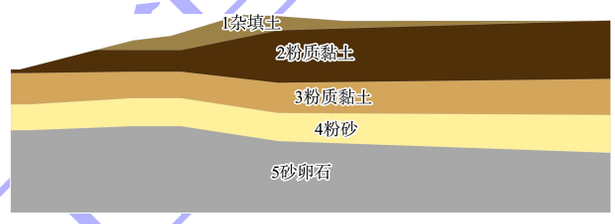


图 2　地质剖面

Fig. 2　Geological section

表 1　各地层预应力管桩桩基设计参数

Tab. 1　Parameters of prestressed pipe pile foundation at different layers

层号	土层名称	桩侧阻力标准值/kPa	桩端阻力标准值/kPa
1	杂填土	15	–
2	粉质黏土	45	–
3	粉质黏土	65	–
4	粉砂	50	–
5	砂卵石	170	5 000

2　荷载情况

1）结构自重力：钢筋混凝土密度取 2.5 g/cm^3。

2）装卸机械：25 t–30 m 门座式起重机，荷载标准值参考 JTS 144-1—2010《港口工程荷载规范》，两门机荷载图示之间的最小距离为 1.5 m。

3）起重机械荷载：门座起重机陆侧轨道后方 1.5 m 到码头前沿为 20 kPa，陆侧轨道后方 1.5 m 到码头后沿为 40 kPa，轨道两侧 1.5 m 区间内禁止堆存。

4）船舶荷载：船舶系缆力标准值为 422.9 kN，系船缆的水平投影与码头前沿线所成的夹角取 30°，系船缆与水平面之间的夹角取 0°；船舶撞击力标

准值为 404.7 kN。

5）水流力：按断面垂线平均流速 2.0 m/s 计算。

6）荷载组合：作用在码头上的荷载主要有永久作用、可变作用、偶然作用，作用效应组合时根据不同结构受力特点，按 JTS 167—2018《码头结构设计规范》的要求，对实际可能在码头结构上同时出现的作用，按极限状态和设计状况进行组合。不同荷载的分项系数取值见表 2。

表 2　分项系数取值

Tab. 2　Partial coefficient value

荷载名称	永久荷载	起重机械荷载	堆货荷载	系缆力	撞击力	水流力
分项系数	1.2	1.5	1.5	1.4	1.5	1.5

3　框架结构设计优化

3.1　原结构设计方案

码头平台上部结构由横梁、纵梁、轨道梁和叠合面板等组成，排架间距为 8.0 m，每榀排架桩基采用 2 根 ϕ900(δ16 mm)钢管桩及 5 根 ϕ1 000(δ130 mm) B 型 PHC 桩(其中 2 根叉桩,3 根直桩)，前方设 ϕ900(δ16 mm)钢靠船构件。为满足船舶在不同水位时系靠码头，前方设 ϕ900(δ16 mm)钢靠船构件，同时设 2 层由 ϕ600(δ14 mm)钢系船梁、ϕ600(δ14 mm)钢横撑和钢走道板组成的钢系靠平台，顶高程分别为 35.41、31.26 m。原结构设计方案剖面见图 3。

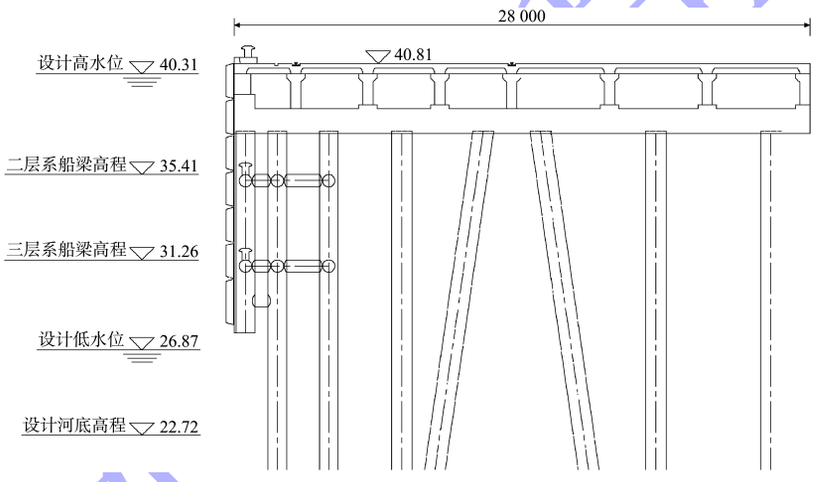


图 3　原结构设计方案剖面（尺寸：mm；高程：m）

Fig. 3　Original structure design scheme（dimension：mm；elevation：m）

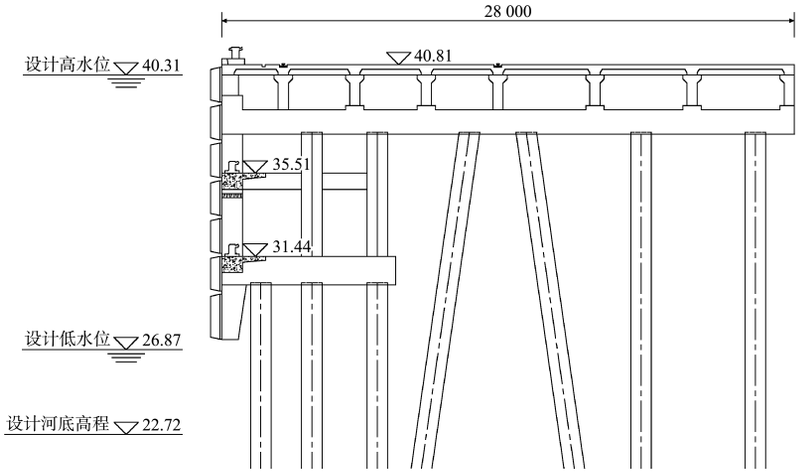
3.2　优化设计方案

混凝土结构相比钢结构具有较好的耐久性，可以很好地解决钢管桩、钢靠船立柱以及钢系缆平台的腐蚀问题，原设计方案采用 2 根钢管桩、钢靠船构件以及纵横撑组成框架结构，以此抵抗低水位下的船舶撞击力。将钢结构替换为混凝土结构后，码头平台也应设计为框架结构，本文优化设计方案将钢管桩替换为 PHC 桩，PHC 桩桩顶设置帽梁，整体连接码头前沿桩基，在帽梁上面设置混凝土立柱与联系撑，形成框架结构，不改变原方案码头上部结构以及后沿 PHC 桩布置。为探究桩基数量及桩基直径对码头优化设计结构受力的影响，提出 3 种优化方案。原方案和优化方案见表 3，优化结构设计方案剖面见图 4。

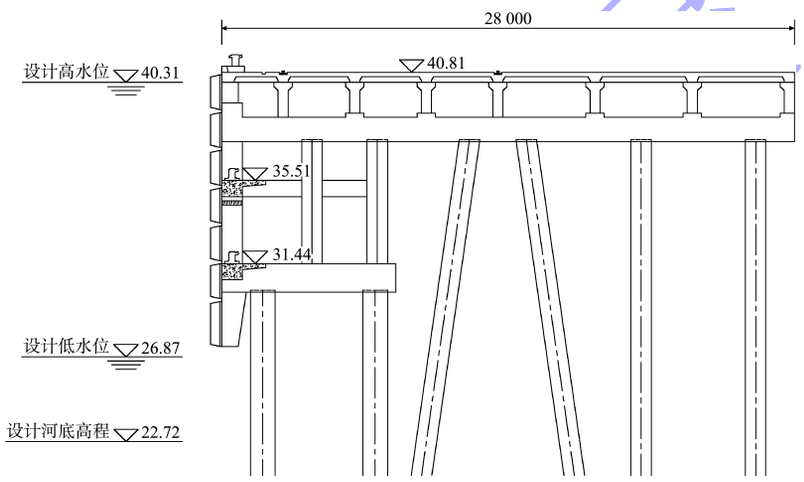
表 3　设计方案

Tab. 3　Design scheme

方案	钢管桩数量	钢管桩规格	PHC 桩基数量	PHC 桩规格
原方案	2	ϕ900(δ16 mm)	5	PHC1000B130
优化方案 1	–	–	7	PHC800B130
优化方案 2	–	–	7	PHC1000B130
优化方案 3	–	–	6	PHC1000B130



a) 优化方案1、2剖面



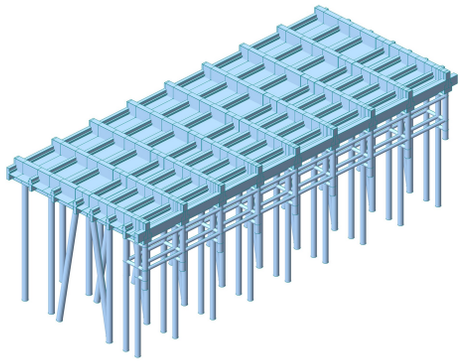
b) 优化方案3剖面

图 4　优化方案剖面（尺寸：mm；高程：m）

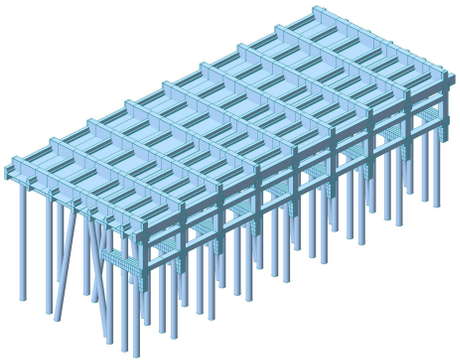
Fig. 4　Optimization plan section（dimension：mm；elevation：m）

4　有限元计算模型建立

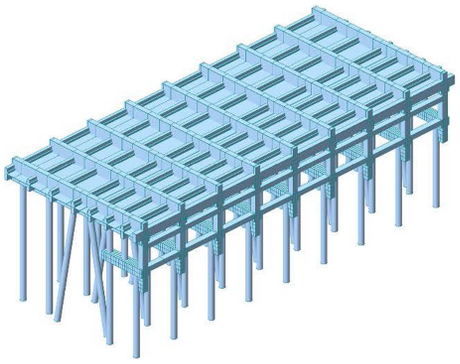
根据设计方案，利用有限元分析软件进行三维建模，选取码头平台其中某一结构段进行计算分析，结构段共 9 榀排架，排架间距 8 m，两端悬臂段长 2 m。横梁、纵梁以及桩基采用梁单元，面板采用板单元，桩帽以及靠船构件采用实体单元，钢管桩与横梁之间的连接采用刚接，PHC 桩与桩帽、横梁之间的连接采用铰接，桩基采用假想嵌固点法。横梁、纵梁以及面板等构件混凝土等级为 C30，钢结构牌号为 Q235，PHC 桩混凝土等级为 C80。原结构三维模型以及优化方案三维模型见图 5。



a) 原结构



b) 优化方案1、2



c) 优化方案3

图 5　优化方案三维模型

Fig. 5　3D model of optimization plan

5　结构受力分析

由于设计优化未改变码头上部结构，且荷载条件相同，不再对纵梁以及面板进行分析，仅对横梁、桩基等构件进行分析。结构分析工况见表 4。

表 4　结构分析工况

Tab. 4　Structural analysis conditions

工况	荷载组合
门机工作	永久作用(结构自重力)+主导可变作用(装卸机械工作状态荷载)+非主导可变作用(船舶荷载、码头面均布荷载、流动机械荷载)
船舶靠泊	永久作用(结构自重力)+主导可变作用(船舶撞击力)+非主导可变作用(码头面均布荷载、装卸机械自重力、流动机械荷载)

5.1　桩基

主要对桩基弯矩进行分析，其计算结果见表 5。从两种工况的计算结果来看，原结构方案桩身最大弯矩位于前两根桩，优化结构方案桩身最大弯矩位于桩帽位置桩基，这是由于原结构前两根桩为钢管桩，钢管桩之间设置横纵撑，形成框架整体受力，优化结构采用桩帽将 PHC 桩连接，形成整体受力，使得桩基弯矩更小，结构更有利。

表 5　桩基弯矩计算结果对比

Tab. 5　Comparison of calculation results of pile foundation bending moment

工况	桩号	桩身最大弯矩/(kN·m)							
		原方案		优化方案 1		优化方案 2		优化方案 3	
		M_y	M_z	M_y	M_z	M_y	M_z	M_y	M_z
1	1	214.2	220.9	184.2	55.8	180.4	64.6	227.1	104.5
	2	186.0	94.7	189.9	54.2	191.8	61.2	–	–
	3	76.5	4.5	202.8	53.9	218.6	60.7	264.9	104.6
	4	77.1	73.7	64.3	99.7	82.2	115.6	88.1	138.0
	5	118.8	73.6	89.5	99.5	124.5	115.2	121.8	137.5
	6	75.6	4.5	97.0	22.8	112.8	23.3	132.4	35.4
	7	75.3	4.5	96.7	22.9	112.1	23.3	131.5	35.5
2	1	119.8	939.9	66.2	256.1	39.1	403.2	50.8	451.1
	2	110.2	960.5	82.9	253.6	66.8	397.9	–	–
	3	29.1	50.0	122.2	254.3	140.0	399.4	155.7	450.1
	4	168.5	63.5	131.4	85.3	178.8	108.2	191.0	119.1
	5	155.7	69.3	116.1	89.7	159.2	114.5	159.4	125.8
	6	56.1	89.9	76.6	83.1	96.6	114.2	105.0	128.9
	7	68.3	89.8	86.0	83.1	110.2	114.2	119.6	128.9

注：1）M_y 为排架内弯矩，M_z 为排架外弯矩。2）优化方案 3 减少了 2 号桩基。3）桩号从江侧至岸侧排序。

5.2　横梁

横梁计算结果见表 6，优化结构方案横梁弯矩、剪力均大于原结构方案，这是由于原结构方案采用钢靠船立柱、2 根钢管桩、5 根 PHC 桩与横梁连接，优化结构方案采用混凝土靠船立柱、2 根混凝土立柱、4 根 PHC 桩与横梁连接，优化结构方案横梁支座较少，跨度较原方案大，使得横梁弯矩、剪力增加，其中，正弯矩增大约 12%，负弯矩增大约 20%，剪力最大增大约 38%。

水运工程

表 6　横梁计算结果对比

Tab. 6　Comparison of beam calculation results

工况	方案	正弯矩/(kN·m)	负弯矩/(kN·m)	剪力/kN
1	原方案	3 423	5 606	1 737
	优化方案 1	4 195	7 064	2 394
	优化方案 2	3 886	6 698	2 397
	优化方案 3	3 391	7 265	1 946
2	原方案	3 074	5 387	1 634
	优化方案 1	3 675	6 875	2 012
	优化方案 2	3 458	6 480	2 012
	优化方案 3	2 845	6 328	1 884

5.3　桩基

1）直径影响。根据优化方案 1 和 2 的桩基弯矩及横梁计算结果对比，随着桩基直径的增大，桩基最大弯矩呈增长趋势，横梁最大弯矩呈减小趋势，最大剪力无变化。这是由于桩基直径越大，结构受力更多由桩基承担，即桩基最大弯矩增大，横梁最大弯矩减小。

2）桩基数量。根据优化方案 2 和 3 的桩基弯矩及横梁计算结果对比，随着桩基数量的降低，桩基最大弯矩呈增长趋势，横梁最大正弯矩、最大剪力呈减小趋势，最大负弯矩呈增大趋势。这是由于桩基减少后，分配至单根桩基弯矩增大，总体呈增大趋势。桩帽及桩基整体结构刚度减小，横梁最大正弯矩、最大剪力有一定降低，下部桩基传递至横梁的最大负弯矩有一定的增加。

5.4　工程优化

优化方案需在低水位下施工，施工季节影响性大，后续可将现浇桩帽优化为预制桩帽，减少现场施工时间。

本文依托工程最终采取了优化方案 2。原方案码头平台工程费用为 6 655.37 万元，优化方案码头平台工程费用为 5 433.8 万元，大幅减少了工程造价。同时采用混凝土结构，可减少后期维护费用。因此，采用该优化方案可提高经济性。

6　结论

1）采用混凝土系靠平台结构可增加系靠平台结构的整体性，有效降低桩基最大弯矩，结构更为有利，但横梁弯矩、剪力均有一定的增加，实际工程上应进行具体分析。

2）随着桩基直径的增大，优化结构桩基最大弯矩呈增长趋势，横梁最大弯矩呈减小趋势，最大剪力无变化；随着桩基数量的降低，优化结构桩基最大弯矩，横梁最大负弯矩呈增长趋势，横梁最大正弯矩、最大剪力呈减小趋势。

3）优化系靠平台结构方案可有效降低工程造价，同时减少后期维护费用，提高经济性。

参考文献：

[1]　孙鹏, 洪思远, 陈晓军, 等. 库区大水位差高桩框架码头设计特点研究[J]. 中国水运, 2024(5): 33-35.
SUN P, HONG S Y, CHEN X J, et al. Study on design characteristics of high pile frame wharf with large water level difference in reservoir area [J]. China water transport, 2024(5): 33-35.

[2]　林红星, 何聪, 冯先导, 等. 高桩码头承插式 T 形桩帽安装灌浆工艺[J]. 水运工程, 2024(10): 225-230.
LIN H X, HE C, FENG X D, et al. Installation of socketed T-pile cap and grouting process for high pile wharf[J]. Port & waterway engineering, 2024(10): 225-230.

[3]　徐俊杰. 内河大水位差架空直立式码头结构设计[J]. 水运工程, 2006(S1): 62-67.
XU J J. Structural design of open-type wharf on piles in rivers with huge water fluctuation [J]. Port & waterway engineering, 2006(S1): 62-67.

[4]　张蕊, 杨斌, 高谭坤. 大水位差码头系靠泊结构形式的探讨[J]. 水运工程, 2011(10): 66-70.
ZHANG R, YANG B, GAO T K. Berthing structural type of wharf with large range of stage [J]. Port & waterway engineering, 2011(10): 66-70.

[5]　贺林林, 谢院仕, 杜亦忠, 等. 多元荷载作用下软基深水高桩码头结构承载特性研究[J]. 水运工程, 2024 (6): 32-40.
HE L L, XIE Y S, DU Y Z, et al. Bearing characteristics of pile-supported wharf in soft soil ground in deep-water under multiple loadings[J]. Port & waterway engineering, 2024(6): 32-40.

（下转第 70 页）

水运工程