



西非某矿石码头桩基结构设计优化*

周 顶^{1,2}, 李昊天³, 王安华³, 李春潮¹

(1. 中国港湾工程有限责任公司, 北京 100027; 2. 中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东 广州 510230;
3. 中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007)

摘要: 西非某矿石码头项目处于内河入海口, 项目位置地质为埋深较浅的高强度微风化花岗岩, 岩石强度较高(单轴抗压强度约为 83 MPa), 岩层上覆盖厚 12~20 m 的软弱淤泥、黏土和砂层。在该地质条件下, 在前端工程设计(FEED)中为确保桩基承载力和规避地质风险, 规定引桥桩基嵌岩深度 4.5 m, 码头嵌岩深度 8 m, 码头总嵌岩长度约 3 852 m, 引桥总嵌岩长度约 1 134 m。在高强度花岗岩中进行嵌岩施工难度大、工效低, 对项目工期是巨大挑战。在工程总承包(EPC)阶段, 通过施工图详细勘察、水文条件和工艺条件细化分析、打入桩在岩层顶面承载力计算的国内外规范研究、码头和引桥结构的精细化计算、方案结合的设计和检测、现场实际检测结果的论证, 实现了优化或取消引桥桩基嵌岩、降低码头桩基嵌岩深度、优化码头排架间距及桩基和梁板的连接方式, 从而达到降低桩基嵌岩工程量和施工难度、满足履约工期的目的, 并获利近千万美元。

关键词: 桩基; 钢管桩; 设计优化

中图分类号: U656.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)09-0076-08

Optimization design of pile foundation structure for ore terminal in West Africa

ZHOU Ding^{1,2}, LI Haotian³, WANG Anhua³, LI Chunchao¹

(1. China Harbor Engineering Co., Ltd., Beijing 100027, China; 2. CCCC-FHDI Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510230, China;
3. CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China)

Abstract: The ore terminal project in West Africa is situated at the estuary of an inland river. The geological conditions at the terminal location consist of shallow-buried, high-strength slightly weathered granite with a uniaxial compressive strength of approximately 83 MPa. This rock layer is overlain by 12–20 m of soft silt, clay, and sand stratas. In the front end engineering design (FEED), to ensure pile foundation bearing capacity and mitigate geological risks, the owner specified a socket depth of 4.5 m into the rock for the access trestle piles and 8 m for the wharf piles, resulting in a total rock-socketed length of 3,852 m for the wharf and 1,134 m for the access trestle. However, constructing sockets in high-strength granite proves extremely challenging, with low efficiency, posing significant risks to the project schedule. During the engineering, procurement, construction (EPC) phase, we optimize the design through detailed geotechnical investigations, refined analyses of hydrological and construction conditions, comparative studies of domestic and international codes for calculating the bearing capacity of driven piles at the rock surface, precise structural calculations for the terminal and access trestle, integration of design and testing protocols, and validation with on-site test results. These efforts lead to the elimination of rock sockets for the access trestle piles, a reduction in the wharf pile socket depth, and optimization of the wharf bent spacing and pile-to-beam connections. Consequently, the rock-socketed quantity and construction complexity are significantly reduced, and the project schedule is achieved, with nearly ten million dollars in profit.

Keywords: pile foundation; steel pipe pile; design optimization

收稿日期: 2024-12-04

*基金项目: 中国港湾重大科技研发项目(2023-ZGKJ-ZDYF-04)

作者简介: 周顶(1973—), 男, 高级工程师, 从事港口与航道工程设计。

1 工程概况

西非某矿石码头位于内河入海口下游东岸, 拟建 3 个 4.18 万 DWT 矿石泊位码头、1 座接岸引桥和其他配套设施, 采用欧标^[1]设计, 项目建成后满足年 6 400 万 t 矿石外运的需求。其中, 矿石码头长 810 m、宽 24.5 m, 引桥长 596 m、宽 18.5 m, 码头、引桥平面位置见图 1。



图 1 西非某矿石码头平面布置
Fig. 1 Layout of ore terminal in West Africa

该码头位于河口段, 涨落潮水流均较大, 极端流速最大 3 m/s。码头、引桥地质为厚 12~20 m 软弱土覆盖层下的坚硬花岗岩。在前端工程设计 (FEED) 中, 为确保桩基承载力和规避地质风险, 规定引桥桩基嵌岩 4.5 m, 码头桩基嵌岩 8 m, 码头总嵌岩长度约 3 852 m, 引桥总嵌岩长度约 1 134 m。

在工程总承包 (EPC) 阶段, 鉴于嵌岩桩施工是项目进度计划的关键路径, 为确保工程履约,

拟引进潜孔锤的施工工艺提高嵌岩工效^[2]; 拟对桩基进行优化, 减少嵌岩深度。项目实施中对水文条件和上部工艺荷载进行细化分析, 对码头和引桥结构进行精细化计算, 优化调整码头、引桥排架间距, 优化引桥上部简支结构为连续结构等, 研究分析国内外对打入桩在岩层顶面的承载力计算规范及相关文献^[3-5], 将桩基设计方案与现场检测结果相结合, 从而降低桩基嵌岩工程量和施工难度, 缩短施工工期和提高工程利润。

2 地质情况

本工程地质为花岗岩上覆盖软土层, 底部为微风化花岗岩, 微风化花岗岩平均抗压强度为 83 MPa。

EPC 阶段引桥地质剖面见图 2, 泥面高程为 -8.40~1.42 m, 中风化/微风化岩面顶高程为 -26~-24 m, 表层覆盖厚度 12~20 m 的软弱淤泥和软黏土层, 表层覆盖层下为厚 3~8 m 较好的黏土和砂土交互层, 整体为上软下硬的地层。

EPC 阶段码头地质剖面见图 3, 泥面高程为 -9~-5 m, 中风化/微风化岩面顶高程为 -32~-25 m, 表层覆盖平均厚度 20.7 m 的软弱淤泥层, 其中标贯击数小于 1 击的淤泥层分布变化剧烈, 码头两侧端部最薄淤泥层厚度仅 0.5 m, 中部淤泥层厚度达到 15 m, 表层覆盖层下为厚 2~9 m 较好的黏土和砂土交互层。

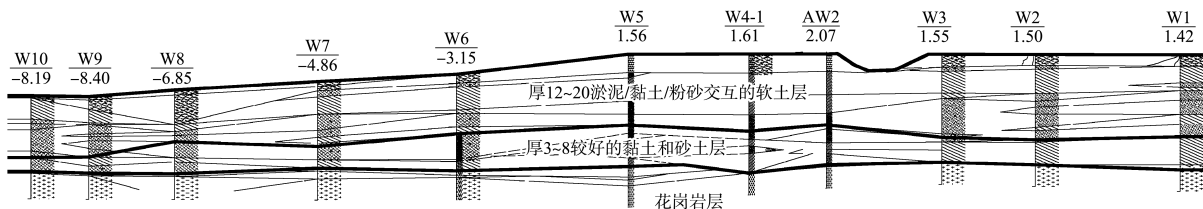


图 2 引桥位置地质剖面 (单位: m)
Fig. 2 Geological profile of access trestle (unit: m)

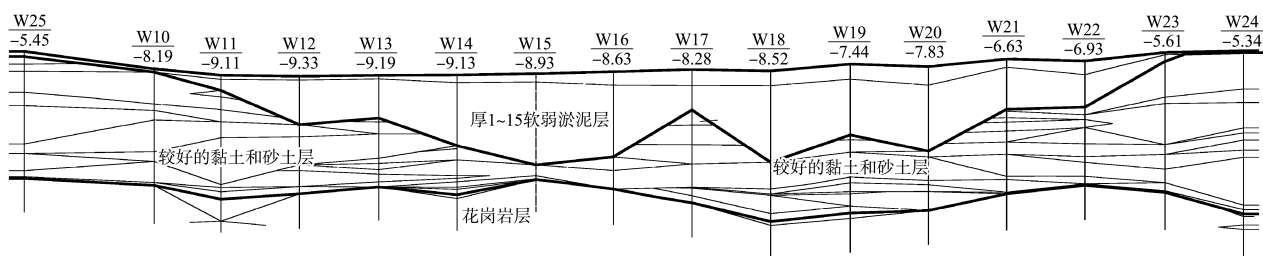


图3 码头位置的地质剖面 (单位: m)

Fig. 3 Geological profile of terminal location (unit: m)

面见图5。

3 原 FEED 方案

3.1 引桥

引桥长度 596 m、宽度 18.5 m，桥面高程 6.0~8.6 m，引桥结构采用桩基排架+上部预应力箱梁结构。引桥桩基采用 $\phi 1200$ mm 钢管桩，桩基嵌岩 4.5 m，单排架 5 根桩，排架间距 15 m，桩基顶部设置现浇横梁。引桥上部结构由 11 榀简支后张预应力预制箱梁和现浇面层组成，引桥断面见图4。

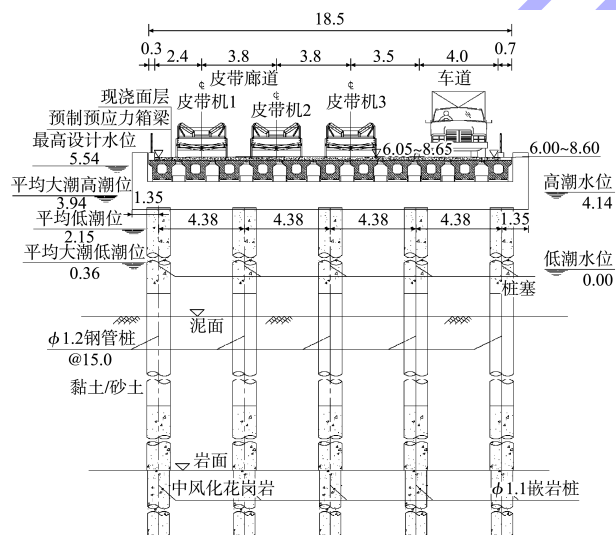


图4 引桥原方案典型断面 (单位: m)

Fig. 4 Typical cross-section of original scheme for access trestle (unit: m)

3.2 码头

码头长 810 m、宽度 24.5 m，顶面高程 8.60 m，港池前沿泥面高程-9.20 m，码头桩基采用 $\phi 1500$ mm 钢管桩，桩基嵌岩 8 m，码头排架 5 根桩，排架间距 7 m。码头上部结构依次为预制横纵梁、预制面板、现浇面层、磨耗层，码头断

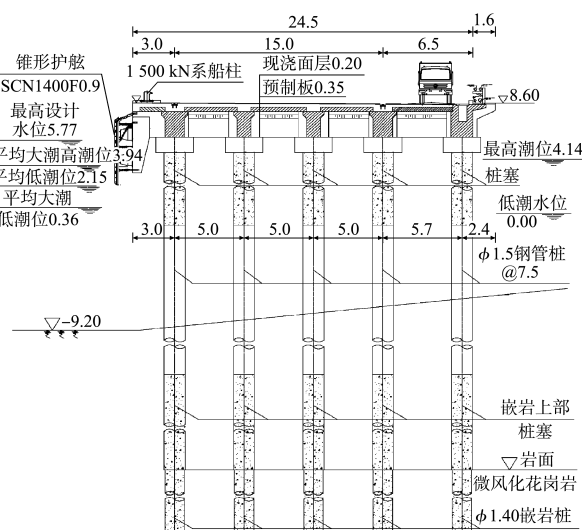


图5 码头原方案典型断面 (单位: m)

Fig. 5 Typical cross-section of original scheme for wharf (unit: m)

4 优化思路分析

4.1 总体思路

原 FEED 中，引桥区域无地质资料，码头区域钻孔间距较大(约 150 m)，上覆软土层变化剧烈，地质风险难以预测，软土层桩基侧摩阻力较小，不能满足承载力要求。对于打入桩在岩层顶面承载力计算，国内外规范无对应计算公式。为控制地质风险，桩基均按照嵌岩设计。引桥跨度为 15 m，在极端水流作用下，上部梁板承受较大水流量，为抵抗水流力引桥单排架考虑为 5 根嵌岩钢管桩。为控制地质风险和水平位移，码头桩基按照最不利钻孔设计，码头单排架为 5 根 $\phi 1500$ mm、壁厚 32 mm 的钢管嵌岩桩，排架间距 7 m。

本工程采用欧标设计，这就要求码头和引桥的位移小于 100 mm 和桩基计算长度的 1/300 的最

小值。本工程桩基竖向承载力和水平位移是桩基设计的两个重要控制因素。

在 EPC 设计阶段, 通过加密地质钻孔间距至 50 m, 对地层进行深化揭示, 落实上部工艺荷载、水文条件等输入, 对不同钻孔地质分段的码头和引桥结构进行精细化计算分析^[6], 通过调整引桥和码头排架间距及桩基布置, 抬高桥面高程降低水流量, 研究国外标准及相关文献^[7-9]中对打入桩沉桩至岩层顶面的承载力计算方法, 最后实现优化桩基数量、钢管桩壁厚、嵌岩深度 (或取消嵌岩), 节省材料用量、降低施工难度, 满足工程履约的要求。

4.2 引桥部分

引桥的优化过程采用设计、施工和检测一体化优化思路。

1) 在 EPC 阶段, 根据对引桥区域的补充勘察揭示的地层分布和水深, 将引桥地质划为 6 个地质分区, 论证引桥覆盖土层能否满足引桥钢管桩的嵌固要求和水平位移限值。

2) 引桥的桥面高程从码头位置 8.6 m 降低到引桥根部 6.0 m, 极端洪水位为 5.54 m, 一半长度的引桥在极端情况下将承受洪水水位的较大水流量。通过抬高引桥根部的桥面高程降低水流力的作用。

3) 优化上部结构, 降低排架间距, 采用简易连续 π 形梁结构替代原预应力箱梁, 从而增加桥梁整体受力性能。

4) 对水流的流速进行分层分析, 降低底层流速, 进而降低桩基的水流量荷载。

5) 研究国外标准 (欧标、美标、德标等) 中打入桩的计算方法、相关文献和现场桩基检测试验及施工过程反馈, 验证引桥桩基竖向承载力满足设计要求。

4.3 码头部分

码头优化过程采用固化靠泊船型、敏感分析、码头结构与功能分区及地层分布充分结合的优化思路。

1) 讨论确认靠泊船型为 4.18 万 DWT 的自航自卸过泊船, 固化船舶等级和靠泊位置, 进而优

化护舷布置和选型。

2) 根据码头结构特点, 采用不同工况的敏感性分析, 计算识别出码头结构的主控荷载为船舶靠泊力和系缆力。

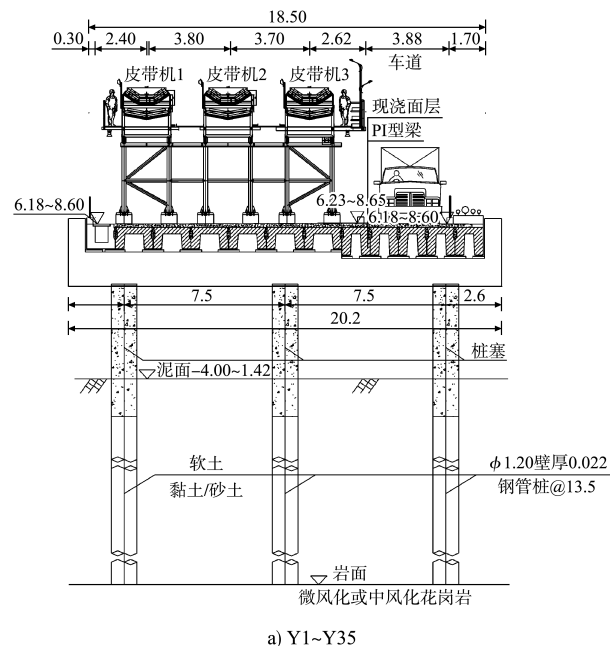
3) 根据码头功能区划分和详细勘察地层分布对码头结构进行精细化分段计算, 确定不同分段的排架桩基布置方式, 抓住主控因素, 对地质条件较好的结构段桩数及嵌岩深度进行优化。

5 主要结构优化后的桩基设计方案

5.1 引桥部分

引桥和码头采用欧标设计, 使用荷载考虑皮带机荷载、装船机荷载和运营车辆荷载, 环境荷载的水流量及风荷载均按照欧标计算, 采用 BS 6349-2:2019 进行荷载组合和欧标计算分析。使用 Midas 和 STAAD. pro 多个软件进行计算分析和验证, 并使用软件计算荷载组合^[10]。

依据 EPC 阶段引桥补勘地质分布, 把长 596 m 的引桥结构划分为 6 个结构段: Y1~Y12 (0~162 m)、Y13~Y25 (162~337.5 m)、Y26~Y30 (337.5~405 m)、Y31~Y35 (405~472.5 m)、Y36~Y40 (472.5~540 m)、Y40~Y41 (540~596 m)。针对每个分区进行详细计算。经过计算分析优化, Y1~Y35 采用 3 根 $\phi 1\ 200\text{ mm}$ 的钢管桩, Y36~Y46 采用 4 根 $\phi 1\ 200\text{ mm}$ 的钢管桩, 引桥断面见图 6。



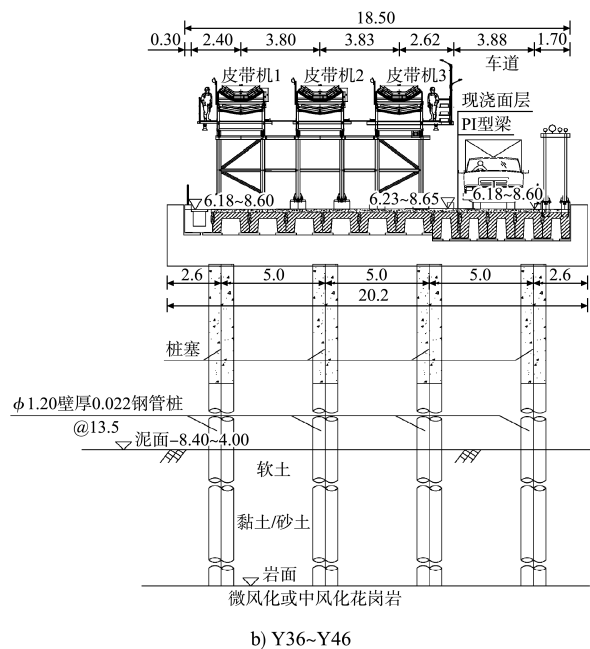


图 6 引桥优化后的断面 (单位: m)

Fig. 6 Cross-section of optimized access trestle (unit: m)

为降低引桥承受的水流力, EPC 阶段通过引桥根部 2 跨抬高过渡桥面高程至 7.0 m, 降低了在桥墩和上部梁板上的水流作用范围, 同时对引桥根部 2 跨采用陆域回填和护岸防护, 从而整体大幅减少了桥梁结构的横向水平力的主控荷载。

根据桥梁承受皮带机荷载的特点及引桥和地质的充分结合, 将引桥上部结构从跨径 15 m 的简支预应力箱梁调整为跨径 13.5 m 的 5 跨连续 π 形梁结构以增加桥梁整体性和降低梁高, 进一步降低水流力对桥梁结构的影响。 π 形梁和横梁顶部钢筋连接实现上下部结构传力, 同时此简支的连续 π 形梁结构设计理念先进, 施工简单方便, 结构整体性能高, 属于创新性结构。

对水流的流速进行分层分析, 把水位划分为表层、中层和地层水位, 水流从上至下根据水流模型结果逐步降低水流流速, 进一步降低桩基的水流力荷载。

经过分段精细化计算分析, 引桥上部连续 π 形梁结构承载能力、裂缝、引桥水位和位移均满足欧标要求。相关结构段的桩基内力、排架位移和钢管桩应力比的结果见表 1。

表 1 优化后引桥的计算结果

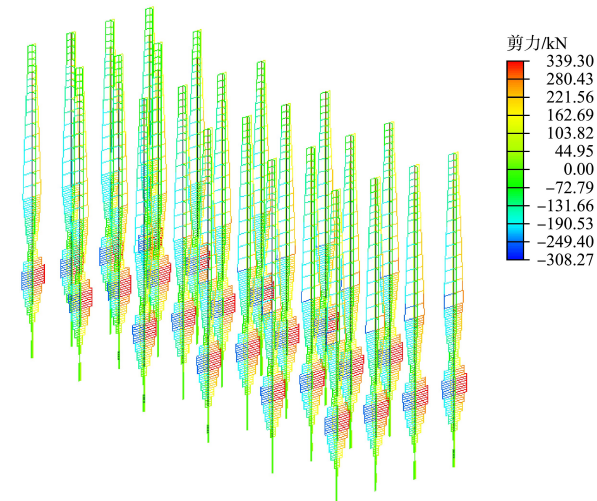
Tab. 1 Calculation results for optimized access trestle

位置	桩力/kN		桩基嵌固点与桩底距离/m	位移/mm	位移限值/mm	钢管桩应力比
	欧标-A1 组合	欧标-A2 组合				
Y1~Y12	6 400	5 150	10	39.0	100	0.711
Y13~Y25	6 400	5 150	10	35.0	100	0.652
Y26~Y30	6 450	5 200	6	56.0	100	0.700
Y31~Y35	6 450	5 200	7	53.0	100	0.700
Y36~Y40	6 350	5 000	5	70.5	100	0.617
Y41~Y46	5 500	4 500	5	73.0	100	0.556

引桥地质表层以软土层为主, 但覆盖层厚度 (18~26 m) 足够, 根据整体施加土弹簧的计算模型分析, 桩基嵌固点距离桩底 5~10 m, 同时桩底剪力均为 0, 验证了桩基有足够的横向嵌固能力; 通过计算分析, 水平位移均满足要求。

根据计算, 引桥最大桩力约为 6 450 kN, 按照欧标试验要求反推桩基极限承载力不小于 10 530 kN。根据地质条件, 桩基也可沉桩至岩层顶面。按照以往施工经验预估打入钢管桩在横向嵌固足够的前提下沉桩至岩面, 取消嵌岩的钢管桩的桩基可满足竖向承载力要求。经过研究国内外标准对打入桩沉桩至岩层顶面的计算公式和说明可知, 尚无明确针对这种软土覆盖下硬质岩地的钢管桩桩基承载力的计算公式。最终拟采用现场桩基静载、动测及沉桩贯入度的现场验证方法作为引桥承载力验证的设计方法。

根据土弹簧整体计算最不利排架 Y41~Y46 的桩基嵌固点深度, 桩基水平剪力和弯矩分布见图 7, 水平位移云图见图 8。



a) 水平剪力

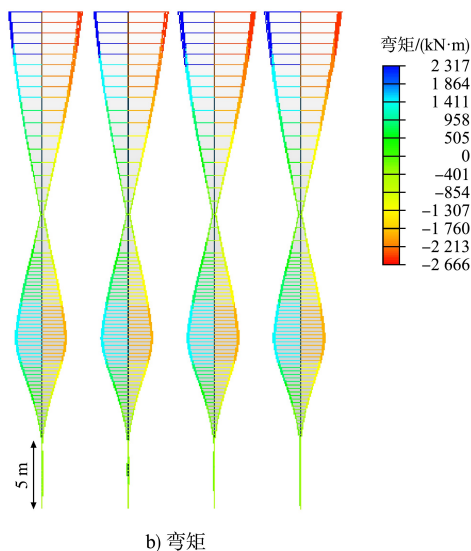


图 7 排架 Y41~Y46 的桩基水平剪力和弯矩分布
Fig. 7 Distribution of horizontal shear force and bending moment of Y41-Y46 framed bents

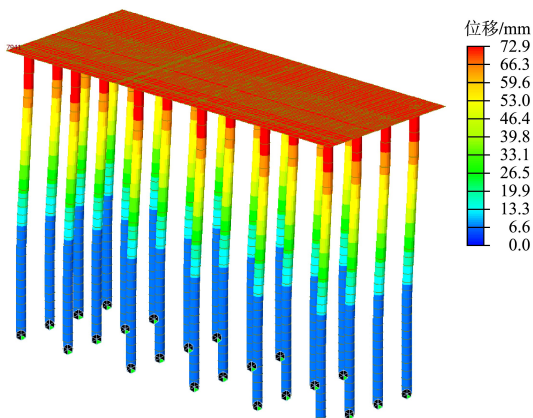


图 8 引桥排架 Y41~Y46 水平位移云图
Fig. 8 Cloud map of horizontal displacement of Y41-Y46 framed bents of access trestle

5.2 码头部分

原 FEED 方案由于设计船型尚未最终确定且兼顾船型较多,为兼顾小船靠泊选用了两锥一板护舷,造成靠泊荷载偏大。EPC 阶段需求确定后,固化靠泊船型为 4.18 万 DWT 自航自卸过泊船。

根据泊位布置和船舶长度,平面布置固定船舶靠泊位置及船舶撞击力和系缆力作用位置,从而降低对码头结构影响。根据 4.18 万 DWT 船型吃水和干舷高度,优化护舷选型^[11],选择低反力一锥一板锥形护舷,单组护舷船舶撞击力降低至原方案的 50% 左右。同时利用 Optimoor 软件对码头各种系泊工况进行细化分析,结合结构受力,对泊位间系缆位置采用分散布置,从而避免泊位端部系缆力集中的问题。

在码头优化设计过程中,针对不同荷载对本码头结构的位移及结构内力进行敏感性分析,识别出船舶撞击力和系缆力是码头桩基设计控制荷载。

根据码头详细勘察揭示,影响码头横向位移的软土分布变化剧烈,码头两侧端部最薄淤泥层厚度仅 0.5 m,中部淤泥层厚度达到 15 m。总体淤泥层分布规律为,码头南北两端淤泥层分布较薄、中部淤泥层分布较厚。

结合码头区域软土层分布,综合考虑码头平面、功能分区、荷载条件,将码头分为 11 个结构段,见图 9。针对码头功能区要求,进行精细化布置,在最北侧结构段 1,将码头结构与变电站平台合并,码头结构宽度由 24.5 m 增加至 43.1 m,增加了合并平台的刚度,桩基直径由 1.5 m 优化为 1.2 m。北侧结构段 2、3 及南侧结构段 9~11 的地质条件较好,同时北侧结构段 2、3 在门机设备作用范围外,因此结构段 2、3、9~11 单排架由 5 根钢管嵌岩桩优化至 4 根。中间结构段 4~8 上部覆盖较厚的软弱土层,地质条件差,且受到船舶荷载较大,为保持码头水平向刚度,单排架维持 5 根钢管嵌岩桩。

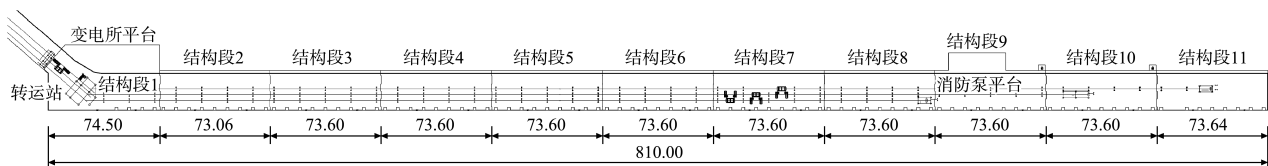


图 9 码头分段 (单位: m)
Fig. 9 Subsection of wharf (unit: m)

针对码头桩基嵌岩，参考相关文献^[12-14]，将 $\phi 1\,500\text{ mm}$ 钢管桩的嵌岩深度优化至 4.5 m ；靠近引桥的码头转运站 $\phi 1\,200\text{ mm}$ 钢管桩参考引桥设置，取消嵌岩。

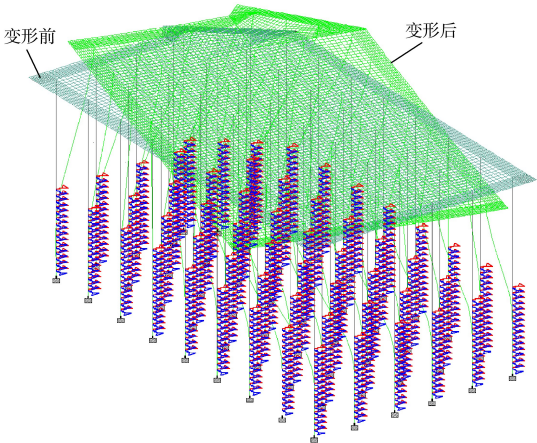
综合地质分布、码头平面、功能分区和荷载条件，经过精细化的结构计算，优化后码头结构计算最不利的排架位移和钢管桩应力比的结果见表 2，桩基内力结果见表 3。可以看出，最大位移出现在中间受船舶力最大的结构段，其变形前后位置对比见图 10，优化后的断面见图 11。经过核算，计算结果均满足要求，同时 $\phi 1\,500\text{ mm}$ 钢管桩壁厚由 32 mm 优化为 28 mm 。

表 2 优化后码头典型位置的计算结果
Tab. 2 Calculation results for typical locations of optimized wharf

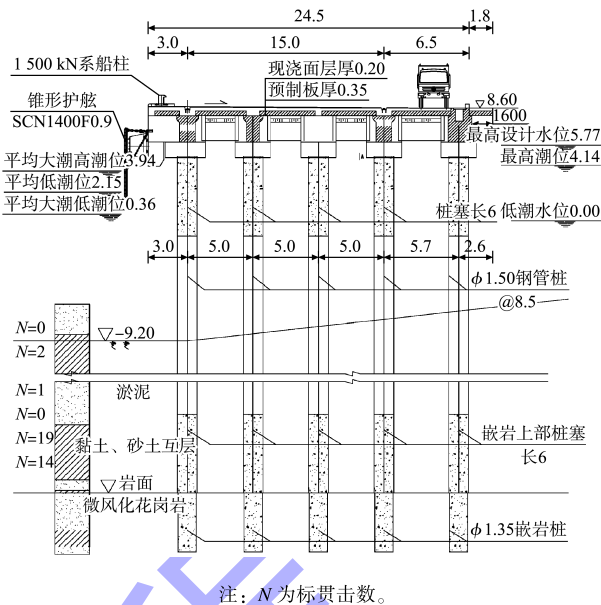
位置	位移/mm	位移限值/mm	钢管桩应力比
W11	74	100	0.479
W12	88	100	0.386
W18	88	100	0.351
W23	66	100	0.450

表 3 优化后码头典型位置的承载力计算结果
Tab. 3 Bearing capacity calculation results for typical locations of optimized wharf

位置	嵌岩长度/m	桩径/mm	A1 组合		A2 组合	
			承载力/kN	桩力/kN	承载力/kN	桩力/kN
W11	0	1 200	9 424	7 701	6 283	5 285
W12	4.5	1 500	16 859	8 373	12 950	6 662
W18	4.5	1 500	16 859	8 762	12 950	7 027
W23	4.5	1 500	16 859	7 796	12 950	6 224



注：图中位移比实际位移放大 200 倍。
图 10 码头结构段 6 变形前后位置对比
Fig. 10 Comparison of positions before and after deformation of wharf structural section 6



注：N 为标贯击数。
图 11 码头优化后的断面（单位：m）
Fig. 11 Cross-section of optimized wharf (unit: m)

6 现场动测和桩基检测情况

根据现场引桥桩基和码头桩基的施工进度，同步开展陆上和水上桩基动测、静载验证工作^[15]。2024 年 7 月完成引桥 1 根桩的陆上静载试验，静载抗压极限承载力标准值为 $13\,000\text{ kN}$ ，满足设计要求。完成引桥 28 根桩的陆上动测试验，占比 19%，结果为 $11\,075\sim 14\,250\text{ kN}$ ，平均值为 $12\,565\text{ kN}$ 。完成引桥 4 根桩的水上动测试验，占比 3%，最小值为 $12\,670\text{ kN}$ ，最大值为 $13\,309\text{ kN}$ ，平均值为 $13\,094\text{ kN}$ ，引桥要求桩基最小极限承载力 $10\,530\text{ kN}$ ，因此所有桩基均满足设计要求，也验证了本设计思路的正确性。

码头引桥侧结构段 1 共 55 根桩，码头平台动测 22 根桩，最小值为 $12\,748\text{ kN}$ ，最大值为 $16\,248\text{ kN}$ ，平均值为 $13\,939\text{ kN}$ ，码头结构段 1 要求桩基最小极限承载力 $12\,500\text{ kN}$ ，动测结果显示桩基承载力满足设计要求。

7 结论

1) 引桥桩基数量从 252 根优化为 149 根，取消嵌岩 $1\,134\text{ m}$ ；码头桩基数量从 636 根优化为 460 根，嵌岩深度减少 $1\,900\text{ m}$ 。缩短了施工工期，并实现工程利润近千万美元。

2) 通过详细勘察地层分布, 梳理水流条件、工艺荷载, 对引桥和码头结构进行分段精细化计算分析, 进而根据各自的特点具体优化排架间距和桩数等, 实现桩基数量及嵌岩深度优化。

3) 通过抬高引桥根部高程, 降低水流力; 引桥采用简易连续 π 形梁结构, 增加整体受力性能, 优化梁高, 降低水流力。分层计算水流流速, 降低桩基水流力。

4) 根据码头结构特点, 采用不同工况的敏感性分析, 计算识别出码头结构的主控荷载为船舶靠泊力和系缆力, 通过合理选择护舷, 降低船舶撞击力。

5) 根据码头功能区划分和地层分布对码头结构进行精细化分段计算, 确定不同分段的排架桩基布置方式, 抓住主控因素, 对地质条件较好的结构段的桩数及嵌岩深度进行优化。

6) 根据对比分析, 对于高桩结构码头, 通过增加码头宽度及横向桩距可以有效提高结构水平方向刚度, 减少受水平方向外力时引起的位移。

7) 通过研究国外标准, 在软土覆盖情况下, 打入桩在硬质岩层顶面的桩基承载力可采用桩基静载、动测及沉桩贯入度的方法进行现场验证, 此设计理念先进并成功得到了验证。

参考文献:

- [1] Maritime works-part 2: code of practice for the design of quay wall, jetties and dolphins: BS 6349-2: 2010 [S]. London: BSI, 2010.
- [2] 薛志武. 无覆盖层条件下码头钻孔桩一体化施工技术[J]. 水运工程, 2020(11): 199-204.
XUE Z W. Bored pile integrated construction technology for wharf without overburden [J]. Port & waterway engineering, 2020(11): 199-204.
- [3] 王安华, 杨国平. 码头设计中桩基有效计算长度分析[J]. 水运工程, 2021(10): 168-172.
WANG A H, YANG G P. Analysis of effective calculation length of pile foundations in jetty design [J]. Port & waterway engineering, 2021(10): 168-172.
- [4] 建筑桩基技术规范: JGJ 94—2008[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
Technical code for building pile foundations: JGJ 94-2008 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008.
- [5] 码头结构设计规范: JTS 167—2018[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2018.
Design code for wharf structures: JTS 167-2018 [S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2018.
- [6] 金苗, 田鑫. 高桩码头结构方案比选及施工要点[J]. 水运工程, 2018(12): 83-85, 127.
JIN M, TIAN X. Comparison and selection of structure scheme of high-piled wharf and construction points [J]. Port & waterway engineering, 2018(12): 83-85, 127.
- [7] Recommendations on piling [S]. Berlin: Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, 2014.
- [8] TVEDT G, TEFERA T. Standardized pile shoes on steel pipe piles [R]. Norwegian: Norwegian Public Roads Administration, 2011.
- [9] HANNIGAN P J, RAUSCHE F, LIKINS G E, et al. Geotechnical engineering circular No. 12-volume II design and construction of driven pile foundations [R]. Washington: National Highway Institute U. S. Department of Transportation Federal Highway Administration, 2016.
- [10] 徐明磊, 邹建强. 长分段高桩码头设计的优化探讨[J]. 港工技术, 2020, 57(5): 59-61.
XU M L, ZOU J Q. Optimal design of long-subsection piled berth [J]. Port engineering technology, 2020, 57(5): 59-61.
- [11] 赵冲久, 熊洪峰, 刘现鹏. 船舶撞击力在高桩码头排架中的分配研究[J]. 水道港口, 2010, 31(2): 132-137.
ZHAO C J, XIONG H F, LIU X P. Ship impact force distribution research of pier bent in high-piled wharf [J]. Journal of waterway and harbor, 2010, 31(2): 132-137.
- [12] 张蕊. 油品码头桩基优化设计和施工工艺[J]. 水运工程, 2021(5): 127-132.
ZHANG R. Optimization design and construction technology of pile foundation of oil wharf [J]. Port & waterway engineering, 2021(5): 127-132.

(下转第 122 页)