



新型整体卸荷式板桩结构 在某挖入式港池中的应用

杨新才, 宋成涛

(中交第二航务工程勘察设计院有限公司, 湖北 武汉 430071)

摘要: 结合某挖入式港池工程, 阐述整体卸荷式组合钢板桩结构方案设计及关键技术。该结构形式充分整合了前板桩墙、 $\phi 1\ 000$ PHC 桩基及卸荷式承台的抗弯能力, 以类似于整体刚性承台的形式来抵抗水平及竖向荷载。该新型结构已在某挖入式港池中成功应用, 可为以后类似工程的设计提供技术参考。

关键词: 挖入式港池; 超大型移动式门式起重机; 整体卸荷式板桩结构; 超长组合钢板桩; 密集型 $\phi 1\ 000$ PHC 桩
中图分类号: U 656. 112 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-4972(2015)07-0198-05

Application of sheet-pile structure with load-relieving slab in excavated harbor basins

YANG Xin-cai, SONG Cheng-tao

(CCCC Second Harbor Consultants Co., Ltd., Wuhan 430071, China)

Abstract: Based on an excavated harbor basin engineering, we expound the design of combined steel sheet-pile structure with a load-relieving slab and its key technology. This structural type fully integrates the bending capacity of the front sheet pile wall, $\phi 1\ 000$ PHC piles and load-relieving slab to resist the horizontal and vertical loads in the form of rigid cap. The novel structure has been successfully used in excavated harbor basins and it provides technical reference for the design of similar projects.

Keywords: excavated harbor basin; huge movable gantry crane; sheet-pile structure with a load-relieving slab; ultra-long combined steel sheet piles; intensive $\phi 1\ 000$ PHC pile

随着我国近些年来港口运输需求的不断增加, 船舶大型化的趋势越来越明显, 码头建设向大型化、深水化方向发展, 而作为码头三大结构形式之一的板桩码头结构的发展却相对滞后, 这主要是由于板桩断面难以满足深水码头急剧增大的抗弯承载力要求^[1]。因此找出一种具有较强水平抵抗能力的板桩码头结构形式十分必要。

近几年来, 板桩码头逐渐应用于大型深水码头工程, 但多为遮帘式板桩码头^[1-3]和分离卸荷式板桩码头^[4], 鲜有整体卸荷式板桩码头。本文结

合某挖入式港池的工程实例, 介绍了整体卸荷式板桩结构的设计及关键技术, 为类似工程结构设计提供依据和借鉴。

1 结构设计考虑的主要因素

1.1 自然条件

- 1) 设计水位 (国家 85 高程系统, 下同)。
设计高水位: 2.60 m (高潮累积频率 10% 潮位);
设计低水位: -1.88 m (低潮累积频率 90% 潮位);

收稿日期: 2014-12-04

作者简介: 杨新才 (1969—), 男, 高级工程师, 从事水运工程设计咨询工作。

极端高水位: 4.29 m (重现期为 50 a 的年极值高水位);

极端低水位: -2.85 m (重现期为 50 a 的年极值低水位);

2) 潮汐。

潮型呈不规则半日潮, 潮周期平均为 12 h 25 min, 受北支河道形态影响, 潮波变形较为剧烈。

3) 地质。

本工程区域内钻探揭示, 地层自地表至 -17 m 高程主要为人工填土及粉细砂, 自 -17 m 至 -29 m 高程为一层较厚的淤泥质粉质黏土, 自 -29 m 至 -40 m 高程为粉质黏土, -40 m 以下为粉质黏土夹砂或粉细砂夹黏性土为主, 可作为本工程基础结构的桩端持力层。

1.2 工艺荷载及使用要求

作用在本工程岸壁结构上的机械荷载为一组超大型移动式门式起重机“宏海号”, 轨道中心距为 124.3 m, 其满载时对基础的作用为: 竖向最大荷载为 3 040 kN/m, 横向最大荷载为 174.3 kN/m, 纵向最大荷载 76.2 kN/m (与起重机行走方向相反)。正常作业情况下, 轨道基础最大竖向永久沉降量不大于 20 mm; 最大横向永久位移不大于 20 mm。

1.3 工程特点、难点

挖入式港池位于长江入海口北支。港池尺寸为 150 m × 110 m (长 × 宽); 其码头面高程应高于防洪设计水位, 并与后方陆域高程一致, 为 4.80 m; 其前沿底高程为 -11.50 m。

1) 板桩墙前后高差达 16.3 m, 且地质土层的中部有较厚的一层淤泥质粉质黏土, 板桩要满足踢脚稳定, 其长度必然超过常规码头;

2) 板桩墙后有土压力及“宏海号”超大的水平荷载, 板桩结构要满足巨大的抗弯能力要求, 板桩结构刚度要超过常规码头;

3) 码头结构需满足上部“宏海号”荷载 (竖向 3 040 kN/m) 作用下的承载力要求及正常使

用期码头最大竖向变形不大于 20 mm 的要求;

4) 码头结构需满足在使用期“宏海号”荷载 (水平向 174.3 kN/m) 的作用下, 码头整体位移小于 20 mm 的要求。

如何根据工程地质和工艺荷载特点, 合理的设计港池岸壁结构, 使其在满足使用功能的基础上, 达到受力合理、经济的要求, 是本工程岸壁结构设计重点及难点。

2 码头结构方案

2.1 码头结构形式选择

由于“宏海号”轨道基础分布于开挖式港池两侧, 兼顾港池岸壁功能, 且轨道基础需承受较大的竖向和水平荷载。故设计采用板桩墙 + 卸荷式桩基承台结构。前墙采用地下连续墙或组合钢板桩结构, 承台下桩基采用 $\phi 1\ 000$ PHC 桩。

如果采用板桩墙与卸荷式承台相分离的结构形式, 前墙须设拉杆及锚碇结构, 而后部轨道承台受“宏海号”竖向和水平荷载, 须设置较多的 PHC 桩来抵抗竖向力及水平力, 这样造价较高。

因此采用板桩墙与卸荷式承台连接成整体的结构形式。由于本工程地质主要为砂性土, 施工时先沉 PHC 桩, 再做前板桩墙, 若前墙采用地下连续墙, 在挤土效应下, 前墙施工困难大, 易塌孔、露筋, 施工过程中的风险较高, 同时地连墙施工工序复杂, 施工工期较长。若前墙采用组合钢板桩结构则可以较好地适应地质与荷载条件, 其中主桩采用 $\phi 1\ 219\delta 18$ mm 圆管型钢板桩, 作为主要受力结构, 具有较强的抗弯能力; 辅桩采用 AZ20-700 mm 钢板桩, 具有良好的传力和互锁性, 这种组合结构具有刚度大、协调变形能力强等特点, 且施工可采用陆上打桩机直接施打, 施工技术相对简单, 施工工期短、质量易控, 造价较低。整体卸荷式板桩结构断面如图 1 所示, 结构段桩位如图 2 所示, 组合钢板桩结构如图 3 所示。

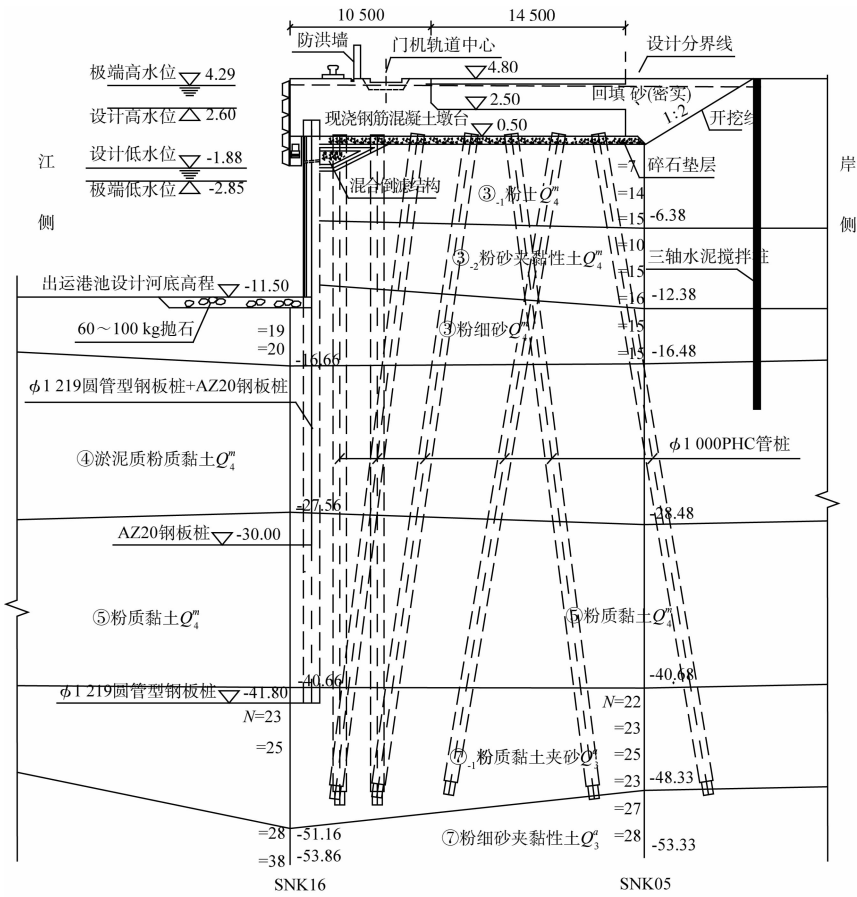


图1 整体卸荷式组合钢板桩结构断面 (高程: m; 尺寸: mm, 下同)

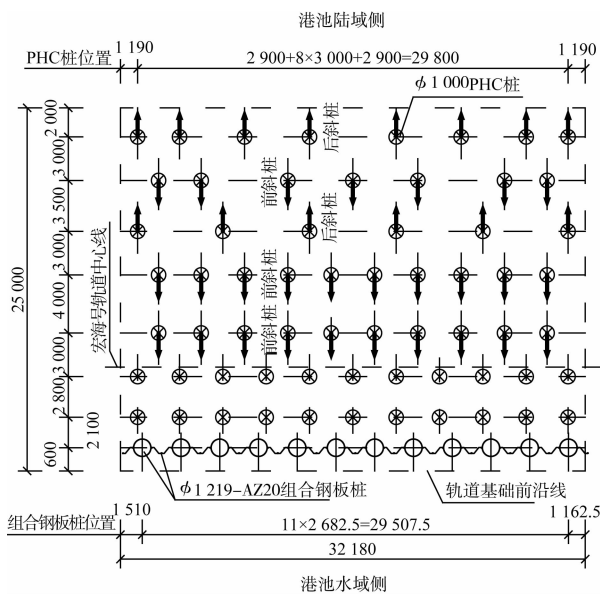


图2 “宏海号”轨道基础结构段桩位

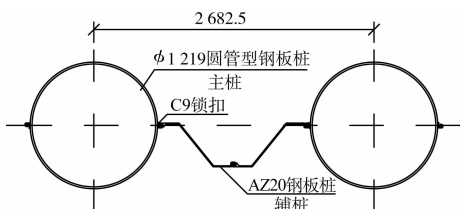


图3 组合钢板桩结构

2.2 码头结构设计

2.2.1 卸荷式承台

板桩墙前后土体高差较大达 16.3 m, 土体产生的水平土压力较大, 因此承台采用卸荷式承台结构。本工程区域上部地层为透水性强的砂层, 地下常水位在 1.0 左右, 设计低水位为 -1.88 m, 若承台底高程太低, 上部结构施工时要考虑降水措施, 将增加施工费用。综合上述因素, 确定承台底高程为 0.5 m。

承台承受上部“宏海号”超大的使用荷载(垂直、水平)、船舶荷载等作用, 并须兼顾严格的变形控制要求, 结构受力状况复杂。根据结构自身安全性要求, 确定其宽度为 25 m, 其中自港池前沿 10.5 m 区域为门机轨道基础的承力区, 其厚度为 4.3 m, 后沿 14.5 m 范围厚度为 2 m。

2.2.2 桩基础

1) 组合钢板桩结构。

前板桩墙结构采用新型的组合钢板桩结构, 由 φ1219δ18 mm 圆管型钢板桩 + AZ20 - 700 mm

钢板桩联合组成。 $\phi 1\ 219\ \text{mm}$ 圆管型钢板桩作为主要受力结构, 具有较强的抗弯能力, 用于承受较大的侧向水平力; AZ20 钢板桩作为辅桩具有良好的传力和互锁性, 在挡土同时将主桩之间土拱范围内的土压力通过锁扣传递给主桩, 同时辅桩有一定的转角适应范围, 可较好地调整打桩偏差而不会出现如脱离、渗漏等问题。

根据前述地质特征, 本工程辅桩需穿过底高程为 $-29\ \text{m}$ 的淤泥质粉质黏土层, 板桩墙长度达 $31\ \text{m}$ 。主桩作为主要受力结构, 除满足前墙踢脚稳定^[5]外, 应进入 $-40\ \text{m}$ 以下的持力层, 根据计算确定 $\phi 1\ 219\ \text{mm}$ 圆管型钢板桩长度为 $43.5\ \text{m}$ 。

2) 承台桩基。

由于卸荷式承台下的桩基础要承受其传递的竖向荷载、水平荷载, 同时满足荷载作用下变形控制要求, 综合考虑地质条件、施工沉桩可实施性以及工程费用等因素, 设计选用竖向承载力及抗弯能力较强的 $\phi 1\ 000\ \text{PHC}$ 桩作为承台桩基。经过计算, 码头前沿 $10.5\ \text{m}$ 范围承台区布置 2 排直桩及 1 排斜桩, 桩基横向最小间距为 $2.8\ \text{m}$, 纵向最小间距为 $3.0\ \text{m}$, 其中斜桩为前斜桩; $10.5\ \text{m}$ 以后承台区布置 4 排斜桩, 分别为 2 排前斜桩 2 排后斜桩, 横向最小间距为 $3\ \text{m}$, 纵向间距在 $3\sim 7\ \text{m}$ 不等。斜桩斜率最大为 6:1。

2.3 计算

设计采用三维有限元方法进行计算, 承台结构采用实体单元建模, $\phi 1\ 000\ \text{PHC}$ 桩基采用杆件单元模拟, 组合钢板桩结构采用等刚度替换的方式折算成钢管桩, 然后采用杆件单元模拟。主要计算结果如表 1 所示。

表 1 主要计算结果

计算模型	前墙弯矩/ ($\text{kN}\cdot\text{m}\cdot\text{m}^{-1}$)	PHC 桩		
		最大轴力/ kN	最小轴力/ kN	最小轴力对应的弯矩/($\text{kN}\cdot\text{m}$)
卸荷式承台方案	1 510.8	5 955.3	-1 040.5	464.8
非卸荷式承台方案	2 094.4	6 399.7	-1 816.7	706.9

由表 1 计算结果可知: 本文提出的设计方案

有效降低了卸荷式承台底高程, 一方面实现了平台的卸荷功能, 以减小土体自重及后方陆域场地荷载产生的土压力; 另一方面卸荷承台上的土体自重对结构整体受力有一定的平衡效应, 减小了前板桩墙的弯矩及 $\phi 1\ 000\ \text{PHC}$ 桩后斜桩的拉力。

3 工程建设

采用 EPC 模式完成设计与施工。设计采用的组合钢板桩结构中主桩 $\phi 1\ 219\ \delta 18\ \text{mm}$ 圆管型钢板桩最长达 $43.5\ \text{m}$, 辅桩 AZ20-700 mm 钢板桩单根最长达 $31\ \text{m}$, 为整桩进口最大长度, 这种长度的组合桩在国内同类工程中尚属首例。施工难点主要是主桩长度较大, 对起吊设备的吊高、吊幅、吊重要求较高, 同时主桩沉桩精度要求远远超过规范规定的标准。

承台的 $\phi 1\ 000\ \text{PHC}$ 桩基密度大、挤土效应大、沉桩难度大; 在直桩与斜桩相交区域, 最小桩基净距仅为 $500\ \text{mm}$, 对沉桩平面定位、垂直度要求高, 沉桩过程中每个环节的控制必须十分严格; 斜桩最大斜率 6:1, 目前国内市场上满足上述要求的陆地沉桩设备较少, 施工难度较大。

根据结构特点, 施工过程中重点解决基桩施工控制问题, 对超长组合钢板桩采用陆地整桩下沉、先振主桩后插辅桩、振打结合、交错下沉的沉桩工艺: 具体控制采用双层双向制导精确的导向架控制桩位, 先振沉主桩至导向架顶 $50\ \text{cm}$ 左右, 5 根主桩为一组, 一组完成后移动导向架至下一组开始重新定位施工; 辅桩施工在主桩之后, 先将辅桩插在主桩之间, 而后振沉辅桩至主桩现有高程, 主桩和辅桩一前一后形成流水作业, 最后利用打桩机复打、送桩到设计高程。对 $\phi 1\ 000\ \text{PHC}$ 桩采用先打斜桩后打直桩、先打长桩后打短桩自中间向两边对称沉桩的工艺。在沉桩过程中严格控制每一道沉桩工艺, 对每一根桩的沉桩过程进行全过程监测。

经过精心的组织和周密的施工, 目前已顺利完成“ $1\ 219\ \delta 18\ \text{mm}$ 圆管型钢板桩 + AZ20-700 mm 钢板桩”及 $\phi 1\ 000\ \text{PHC}$ 桩的施工, 并形成了“超

长组合钢板桩施工工法”及“陆上大直径 PHC 斜桩施工工法”，供同类工程参考。

4 结语

1) 该整体卸荷式板桩码头结构形式充分整合了前板桩墙、 $\phi 1\ 000$ PHC 桩基及卸荷式承台抗弯能力，以类似整体刚性承台作用的形式来抵抗门机（垂向和竖向）荷载、土压力、剩余水压力及船舶荷载等荷载作用，结构受力状况合理，是一种适应深水及大型荷载作用下的新型板桩码头结构形式。

2) “ $\phi 1\ 219\delta 18$ mm 圆管型钢板桩 + AZ20-700 mm 钢板桩”组合结构及 $\phi 1\ 000$ PHC 桩基的布设对施工控制精度较高，施工难度较大，在国内均尚无先例。为研究桩基沉桩施工方案，设计与施工进行多次专题研究，提出了相应的沉桩施工工法，目前本工程桩基结构已顺利完成，沉桩控制标准达到设计要求。在实施过程中提炼出来的新的施工工法，为以后的工程桩基设计及施工提供一种新的思路和方法。

3) 整体卸荷式板桩结构受力复杂。由于这种整体卸荷式板桩结构属国内首次提出，所以无相

应的设计规范可循，目前亦没有成熟的计算理论及计算方法。设计对本工程进行了原型观测^[6]，通过研究施工期及使用期板桩码头结构的变形、内力及土压力分布变化规律等，为工程提供原型数据和相关资料，并探讨该种新型结构的工作机理，为类似工程结构的设计提供借鉴。

参考文献：

[1] 刘永绣. 板桩码头向深水化发展的方案构思和实践-遮帘式板桩码头新结构的开发[J]. 港工技术, 2005(S1): 12-15.

[2] 刘永绣, 吴荔丹, 李元音. 一种新型码头结构形式-半遮帘式深水板桩码头结构的推出[J]. 港工技术, 2005(S1): 16-19.

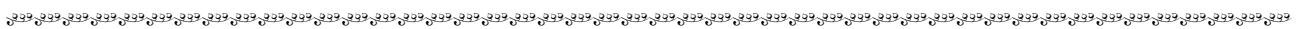
[3] 于泳. 遮帘式板桩码头方案的提出与研究[J]. 港工技术: 2005(S1): 30-32.

[4] 虞辉, 李利军. 分离卸荷式板桩码头工作性状的数值分析[J]. 公路交通科技: 应用技术版, 2012(2): 167-169.

[5] JTS 167-3—2009 板桩码头设计与施工规范[S].

[6] 吴爱清, 俞武华, 程凯. 适用超大型门式起重机出运工艺的新型海洋重工码头设计创新[J]. 水运工程, 2013(12): 35-40.

(本文编辑 郭雪珍)



(上接第 189 页)

5 结论

1) 通过固体颗粒在液体中的沉降运动规律研究，可以分析溢流施工工艺在航道疏浚工程中的适用性。

2) 当采用本文方法所计算的颗粒纵向漂移距离大于航槽长度时，对航道疏浚工程航道的成槽率是有益的，用此方法可用来初步判断是否适合采用装舱溢流施工工艺。

3) 当疏浚工程附近环境需要保护时，可用本文方法估算颗粒的漂移范围，进而判断是否会对周围水环境产生影响，调整施工方法以保护环境。

参考文献：

[1] 郝宇驰, 洪国军, 王超. 耙吸挖泥船装舱溢流过程中非

黏性泥沙沉积与冲刷的模拟[J]. 水运工程, 2012(12): 119-125.

[2] 戴承礼, 张家琪, 郑永恩, 等. 自航耙吸挖泥船装舱溢流施工对附近水域环境影响的试验分析[J]. 水运工程, 1997(10): 59-62.

[3] 朱剑飞, 寇军. 长江口疏浚工程中疏浚溢流施工工艺的适用性研究[C]//第 19 届世界疏浚大会论文集. 北京: 中国疏浚协会, 2011: 259-266.

[4] 张忱, 洪国军. 自航耙吸挖泥船装舱溢流模型试验[C]//左其华, 窦希萍. 第 13 届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集. 北京: 海洋出版社, 2007: 725-729.

[5] 吴修广, 季大闰, 史英标, 等. 港池和航道疏浚过程中悬浮泥沙扩散输移的数值模拟[J]. 水运工程, 2006(8): 87-91.

(本文编辑 武亚庆)