

## · 港 口 ·



# 大型深水板桩码头水平位移控制

林先炜，杨克勤

(中交第四航务工程勘察设计院有限公司，广东 广州 510290)

**摘要：**针对传统板桩结构在大型码头应用中，尤其在大堆载、软土地基及深水环境下，呈现出水平位移过大的问题，采用PLAXIS 3D有限元软件进行模拟计算，分析造成板桩结构水平位移大的主要因素，制定有效的应对措施，并对比优化方案在不同水深环境下的水平位移。结果表明，在结构上采取卸荷措施、合理布置搅拌桩和旋喷桩、设置良好的排水通道、减轻后方回填料质量等4项具体措施使大型板桩码头位移得到有效控制，满足英标中的水平位移限值的要求，同时能带来相应的经济效益。

**关键词：**深水板桩码头；水平位移；有限元计算；控制措施；软土

中图分类号：U 656.1+12

文献标志码：A

文章编号：1002-4972(2022)05-0033-05

## Horizontal displacement control of large-scale deepwater sheet-pile wharf

LIN Xian-wei, YANG Ke-qin

(CCCC-FHDI Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510290, China)

**Abstract:** Aiming at the problem that the traditional sheet-pile structure presents excessive horizontal displacement in the application of large-scale wharf, especially for heavy load, soft soil foundation and deep water, we use the finite element software of PLAXIS 3D for simulation calculation, analyze the main factors causing the large horizontal displacement of the sheet-pile structure, formulate the effective countermeasures, and compare the horizontal displacement of the optimized scheme under the different water depth environments. The results show that the four specific measures of unloading measure on the structure, reasonable arrangement of mixing pile and jet-grouted pile, setting up good drainage channel, and reducing the mass of backfill material can effectively control the horizontal displacement, meet the limit value of British standard, and bring corresponding economic benefit at the same time.

**Keywords:** deepwater sheet-pile wharf; horizontal displacement; finite element calculation; control measure; soft soil

传统中小型板桩码头通常在码头后方设置锚碇结构，并通过拉杆连接前板桩墙和锚碇结构以维持结构稳定、控制结构位移。而大型板桩码头，尤其在软土地基上建造的深水板桩码头，由于码头面至港池底的悬臂高度大，墙后土体物理力学指标差，使墙后主动土压力大幅增加，墙前被动土压力区受到更大挤压，锚碇墙、拉杆及板桩墙自身变形也增大。仅仅依靠设置传统锚碇结构已

难以控制码头位移，极易出现码头面位移过大而前倾的现象，且位移量沿码头纵向通常不均匀，导致前沿线不顺直，造成前轨道梁中心线错位，带动钢轨扭曲，严重时甚至折断钢轨，使结构存在较大安全隐患<sup>[1]</sup>。同时，由于后轨道梁位移相对较小，使前后轨间距变大，影响码头装卸设备的正常行驶。板桩码头水平位移过大不仅影响码头使用及结构外观，甚至存在一定安全隐患。另

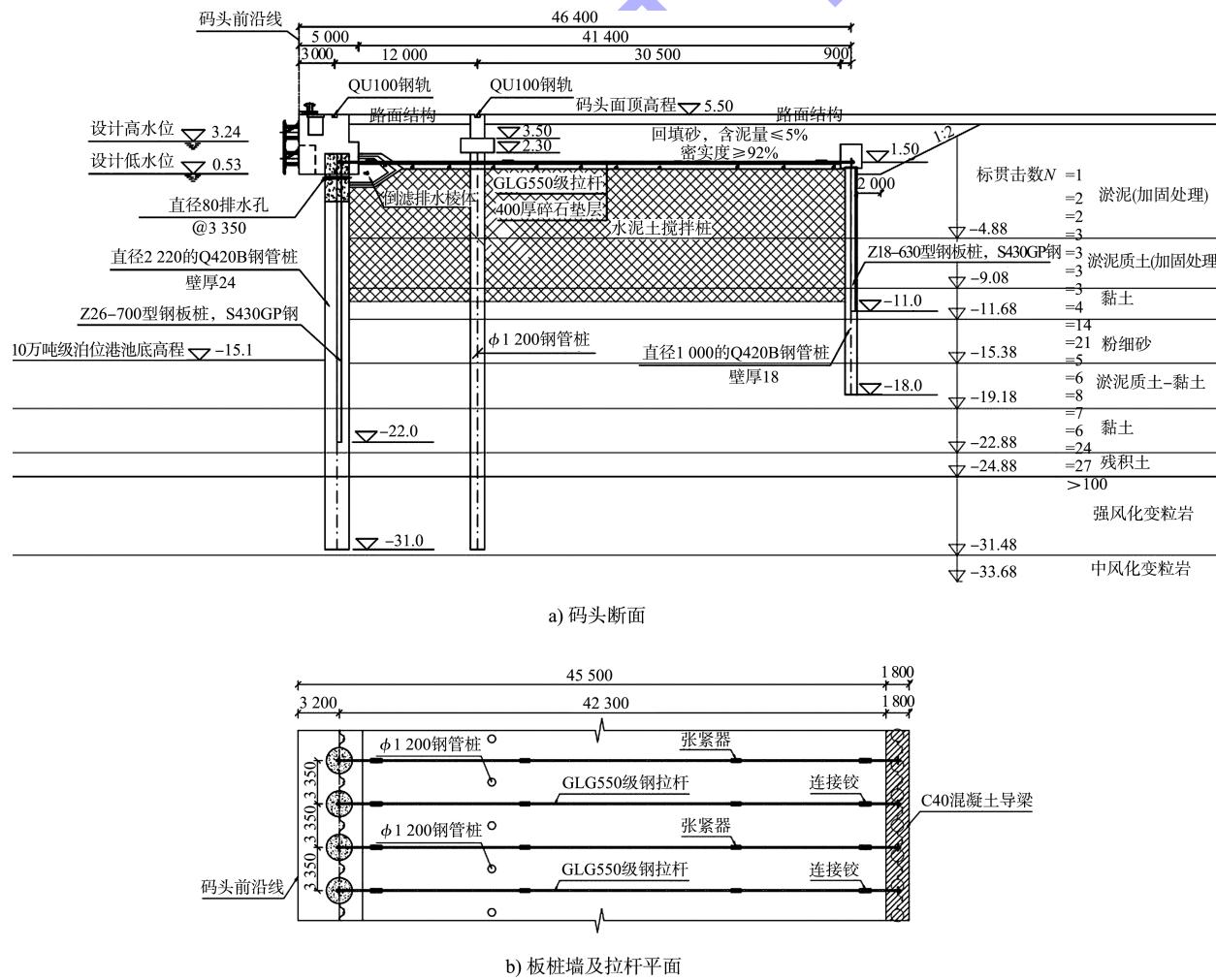
外,目前国内规范对板桩码头水平位移或最大位移的限值并无相关规定,对位移的控制全凭设计人员自身经验把控,也未明确提出控制板桩码头结构水平位移的成熟技术手段。

为了克服传统板桩结构在大型码头应用中的不足,本文结合广州港南沙港区泊位工程,采用岩土有限元软件 PLAXIS 3D 进行模拟,从结构构造、地基设计、外部受力条件等角度进行分析,并提出改良措施,减小码头水平位移,以进一步增加码头结构的安全稳定性,并对优化方案在不同港池底高程下的位移进行适应性分析。

## 1 工程概况

大型 10 万吨级板桩码头工程的码头面高程 5.6 m, 前沿港池底高程-15.1 m。码头结构原设

计方案采用单锚板桩结构,前墙采用直径钢管桩与 Z 形钢板桩组合。拉杆直径为 130 mm, 间距 3.35 m。锚碇结构采用直径 1 m 钢管桩与 Z 形钢板桩组合,后方陆域软基采用真空联合堆载预压处理,联合堆载厚度 3.0 m, 锚碇墙到前板桩之间采用水泥土搅拌桩处理,墙后 0.5 m 以上回填砂。板桩后设直径 80 mm 排水孔,排水孔后设混合倒滤棱体。码头前沿布置 2 条轨道,前轨直接铺设在胸墙上,后轨铺设于轨道梁上。码头面设计均载 80 kPa,超过常规码头使用荷载。此外,本工程场地表层为人工吹填的松软的淤泥及砂混淤泥层,填土下方淤泥广泛分布,粉质黏土层下方又存在淤泥质黏土软弱夹层,该夹层埋深大,物理力学指标差。典型断面和平面如图 1 所示。



## 2 有限元模拟

采用基于弹塑性理论的 PLAXIS 3D 有限元法模拟板桩结构水平位移, 该方法是对真实物理系统的仿真, 得出的结果较为精准<sup>[2]</sup>。在三维有限元模型中土体全部采用弹塑性的硬化土模型 (hardening soil model), 其弹性部分可分别考虑土体的加载、卸载刚度及土体模量随应力增加而增大的特性, 而塑性部分则采用非相关联流动法则和各向同性的硬化准则, 能较好地描述曲线形式

的应力-应变关系和土体的剪胀性, 因此可较好地模拟港池开挖及堆载预压卸载后应力路径对土体及板桩结构的影响, 得出的结果更符合实际情况<sup>[3]</sup>。对前板桩墙、后锚定墙采用板单元模拟, 并在板桩墙、锚定墙与前后土体之间均加入界面单元模拟接触的实际性质。桩基结构采用嵌入式梁单元模拟, 拉杆采用点对点锚杆单元模拟, 上部胸墙及卸荷平台采用实体单元模拟。模型中所采用的参数见表 1、2。

表 1 土体在 PLAXIS 3D 有限元模型中的参数取值

土类	切线刚度/ MPa	割线刚度/ MPa	卸载弹性 模量/MPa	黏聚力/ kPa	密度/ (t·m <sup>-3</sup> )	内摩擦角/ (°)	泊松比	排水类型
淤泥	2.27	2.27	6.81	12.9	1.62	27.6	0.29	不排水
淤泥质土	3.00	3.00	9.00	8.0	1.70	26.0	0.29	不排水
黏土	4.28	4.28	12.85	17.0	1.81	24.5	0.28	不排水
粉细砂	12.00	12.00	36.00	0	1.80	28.0	0.28	排水
残积土	4.11	4.11	12.33	12.2	1.79	31.8	0.30	不排水
强风化变粒岩	30.00	30.00	90.00	-	1.94	32.0	0.25	排水
中风化变粒岩	100.00	100.00	300.00	-	2.45	45.0	0.25	排水
振冲密实中粗砂	25.00	25.00	75.00	-	1.85	32.0	0.29	排水

表 2 模型中混凝土及拉杆材料参数

名称	天然密度/ (t·m <sup>-3</sup> )	饱和密度/ (t·m <sup>-3</sup> )	弹性模量/ GPa	泊松比
混凝土	2.40	2.40	30	0.167
拉杆	7.85	7.85	200	0.300

通过岩土有限元软件 PLAXIS 3D 模拟计算, 码头结构前沿最大总水平位移达 327 mm, 其中工后使用阶段最大水平位移为 157 mm, 整体模型的水平位移云图见图 2。根据英标<sup>[4]</sup>, 板桩码头使用期最大水平位移应小于  $H/300$  且不大 100 mm, 其中  $H$  为码头悬臂高度, 即该工程水平位移不应小于 69 mm。原设计方案模拟结果较英标差距较大。

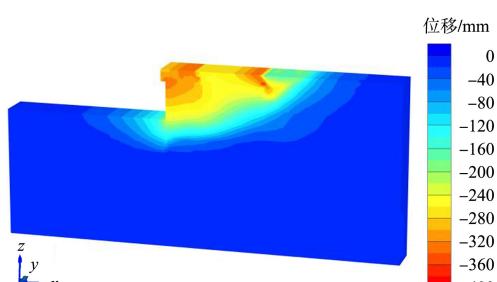


图 2 码头整体模型水平位移云图

根据计算分析, 造成码头结构水平位移主要有以下方面: 1) 工程水深超过 16 m, 码头面至港池底最大高差超过 20 m。前墙悬臂长度大, 结构位移与悬臂长度呈正相关, 且墙后大部分土体长时间处于饱水状态, 土体有效固结应力较小, 强度难以增加, 使得板桩墙后主动土压力大。2) 拟建区域软土层最大厚度达 15 m, 软土力学性能差, 土压力大, 使得墙后挤土作用明显; 港池底高程以下部分软土厚度分布不均, 局部位置分布有 3.5 m 厚的淤泥质土层, 严重减小板桩前被动土压力。3) 原设计方案排水孔径小、间距大, 且易于被海洋生物附着而堵塞, 使排水效果较差, 若遇到大潮差或暴雨工况, 板桩墙后剩余水头将急剧上涨, 结构设计所应考虑承受的剩余水压力大幅增加。4) 后轨道梁后方使用荷载达 80 kPa, 超过常规码头使用荷载, 使板桩墙产生较大的附加土压力。

## 3 结构优化方案

### 3.1 结构上采取卸荷措施(措施 1)

在胸墙与后轨道梁之间设置现浇连续钢筋混

混凝土平台，将胸墙和后轨道梁连接成整体，且沿码头纵向连续布置，如图 3 所示。

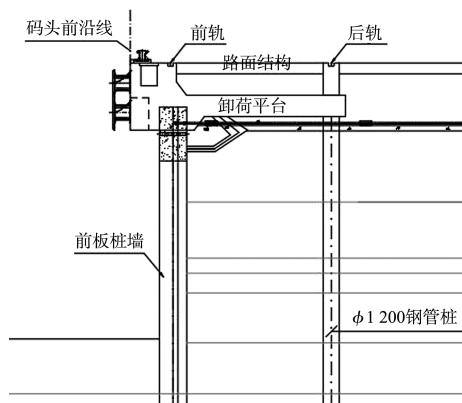


图 3 卸荷平台结构

由于卸荷平台的存在，使得承台上方结构自身重力及荷载作用于承台，并通过支撑承台的桩基传递至地基土，从而完全卸除这部分荷载对前墙产生的土压力；该整体式卸荷平台与重力式码头卸荷板类似，可对位于其后方的填土和使用荷载产生卸荷作用，从而减小这部分荷载产生的土压力。此外，由于后轨道梁下桩基采用间隔布置的钢管桩，桩距较小，会在桩间产生土拱作用，使后轨道梁下桩基受力增加，从而进一步削弱前

板桩墙所受土压力。同时，卸荷平台将前后轨基础连接成整体，确保了变形一致，避免因前后轨水平位移过大而使门机无法正常行驶的问题。

### 3.2 合理布置搅拌桩和旋喷桩(措施 2)

将搅拌桩布置由常规的三角形或正方形布置，改为格栅形布置，相邻桩均有搭接，增强了搅拌桩处理地基的整体性；考虑到卸荷平台的作用，取消板桩墙后卸荷平台下方水泥搅拌桩(即水泥搅拌桩从卸荷平台后沿开始布置)，并对锚碇墙前搅拌桩处理置换率进行优化，距离锚碇墙由远及近的搅拌桩置换率分别采用 40%、60%、100%；考虑到锚碇墙先于搅拌桩施工，搅拌桩施工时无法做到紧贴锚碇墙。为此，将最靠近锚碇墙的一排搅拌桩改为旋喷桩，并在锚碇墙及搅拌桩施工完成后施工，使锚碇墙前无空隙；对于板桩墙前存在软弱土层的局部区域，采用高压旋喷桩加固处理，增加墙前被动土压力。搅拌桩及旋喷桩布置如图 4 所示。同时，对搅拌桩及旋喷桩进行强度及水泥用量双控，不仅要求达到设计强度，而且要求水泥用量不低于设计值，并要求采用自动化监控系统对过程进行监控。

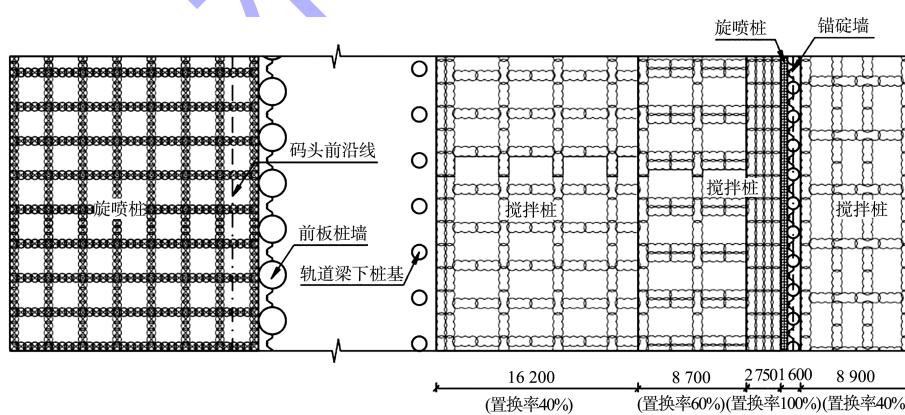


图 4 搅拌桩及旋喷桩平面布置 (单位: mm)

该措施使搅拌桩和旋喷桩的布置更加合理，施工质量得以保障，大幅提高了板桩墙后土体的力学指标。

### 3.3 设置良好的排水通道(措施 3)

取消原设计方案中的排水孔，在板桩墙顶部

与胸墙底部之间设置排水通缝，缝宽 100 mm 左右，缝后方设置倒滤结构。排水缝可通过施打钢板桩时使得钢板桩顶高程低于胸墙底高程 100 mm 形成，也可以在打完钢板桩后，部分割除钢板桩顶，形成凹槽<sup>[5]</sup>。

该措施可大幅增加排水通道的截面积, 能快速、有效地排除板桩墙后剩余水头, 易于实施。在使用过程中, 不易被海洋附着生物堵塞, 为可靠的排水通道。通过优化排水通道, 板桩墙后剩余水头可按规范取小值, 以减少板桩墙外部荷载。

### 3.4 减轻后方回填料质量(措施 4)

在拉杆上方后轨道梁与锚碇墙之间采用现浇泡沫轻质土, 其湿密度为  $1.05 \text{ t/m}^3$ (略大于海水密度), 每换填厚  $1 \text{ m}$  的回填砂或土, 可降低荷载约  $7 \text{ kPa}$ , 本工程换填厚约  $3.5 \text{ m}$  的回填土, 累积降低荷载约  $25 \text{ kPa}$ 。实施该措施, 可有效减小码头面大堆载联合回填料大重力对前板桩墙带来的强大挤土作用。同时, 泡沫轻质土具有类似混凝土属性(强度  $1 \text{ MPa}$  以上), 可以将上部荷载向地基传导, 减小上部荷载产生的水平土压力。

### 3.5 模拟计算验证

采用岩土有限元软件 PLAXIS 3D 分成 4 个工况对上述措施进行模拟计算验证: 1) 工况 1 为在原设计方案基础上实施措施 1; 2) 工况 2 为联合实施措施 1 和 2; 3) 工况 3 为联合实施措施 1~3; 4) 工况 4 为联合实施措施 1~4。计算结果见表 3。

表 3 模拟验证计算结果

工况	最大总水平位移/mm	使用期最大水平位移/mm
1	290	130
2	238	104
3	211	81
4	186	62

由计算结果可以看出, 实施措施 1~4 分别可使板桩码头最大总水平位移依次减小  $11.6\%$ 、 $15.8\%$ 、 $7.0\%$ 、 $8.8\%$ ; 使用期最大水平位移依次减小  $17.2\%$ 、 $16.6\%$ 、 $14.6\%$ 、 $12.1\%$ , 累计减少  $60.5\%$ , 同时满足英标相应的控制标准。

调整联合实施 4 项措施优化方案下的港池底高程, 并将结果进行对比, 计算结果见表 4。可以看出, 优化方案中随着港池底高程加深, 最大总水平位移显著增大, 而使用期最大水平位移对照英标控制标准的富余度也减少, 当港池底高程为  $-23.1 \text{ m}$  时, 使用期最大水平位移恰好满足英标控

制要求。

表 4 不同港池底高程水平位移计算结果

港池底高程/m	最大总水平位移/mm	使用期最大水平位移(英标限值)/mm
-23.1	295	96(96)
-20.1	251	85(86)
-17.1	215	72(76)
-15.1	186	62(69)
-13.1	161	54(62)

### 4 经济性分析

对 4 项措施实施前后进行技术经济比较。措施 1 设置卸荷平台增加的混凝土量及措施 4 中后方部分回填中粗砂替换为泡沫轻质土使工程投资有所增加, 措施 3 基本不增加工程投资, 而措施 2 通过优化搅拌桩布置, 使搅拌桩和旋喷桩总用量略有减少。同时通过以上 4 项措施的联合实施, 板桩码头前墙及拉杆内力大幅降低, 前板桩墙及拉杆结构可进行优化, 节省了钢材用量。

经计算, 方案优化前、后码头水工结构每延米工程费用分别为  $58.6$  万、 $57.3$  万元, 节省工程投资约  $2\%$ 。此外, 优化方案减少了因码头前倾而产生的后期维护费用, 产生一定的间接经济效益。

### 5 结语

1) 通过岩土有限元软件 PLAXIS 3D 模拟计算, 采用传统结构方案的大型板桩码头产生较大水平位移, 使用期水平位移与英标要求尚有差距。

2) 通过在结构上采取卸荷措施、合理布置搅拌桩和旋喷桩、设置良好的排水通、减轻后方回填料质量等 4 项措施对减少板桩码头水平位移均起到有效作用, 最终使用期水平位移结果满足要求。

3) 优化方案可适应于更大水深的工况, 为板桩码头步入更大吨级提供支撑力量, 也为同类型码头设计提供参考。

4) 通过联合实施系列位移控制措施, 可使板桩码头水工结构工程总投资有所减少, 同时减少后期维护费用, 产生一定的直接和间接经济效益。