

百米长度分段的胸墙结构 在板桩码头中的应用

文 涛, 李春阳, 刘 洋, 杨 旭

(中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东 广州 510290)

摘要: 基于整体性、差异沉降及工程造价等原因, 大型板桩码头的胸墙结构需要采用长分段方案, 其分段长度往往要突破规范的上限长度。针对广州港南沙四期码头工程采用的超长胸墙结构, 建立胸墙三维有限元计算模型, 计算中考虑混凝土收缩及环境温度变化的影响。计算结果表明, 百米分段胸墙的结构内力远大于普通项目, 胸墙位移和内力呈现出不同的变化趋势。百米长度分段的胸墙结构在广州港南沙四期码头工程中取得了良好效果。

关键词: 胸墙; 板桩码头; 温度; 超长分段

中图分类号: U 653.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)10-0124-05

Application of breast wall structure with 100 m segment in sheet pile wharf

WEN Tao, LI Chun-yang, LIU Yang, YANG Xu

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

Abstract: Due to the integrity, differential settlement, engineering cost, and other reasons, the breast wall structure in large sheet pile wharfs requires a long segment, whose length often breaks through the upper limit as stipulated in standards. In view of the extra-long breast wall structure used in the Nansha Phase IV wharf project of Guangzhou Port, this paper establishes a three-dimensional finite element calculation model of the breast wall and considers the influence of concrete shrinkage and environmental temperature change during the calculation. The calculation results show that the structural internal force of the breast wall with a 100 m segment is much stronger than that of the common wall, and the displacement and internal force of the breast wall show different changing trends. The breast wall structure with a 100 m segment has achieved positive results in the Nansha Phase IV wharf project of Guangzhou Port.

Keywords: breast wall; sheet pile wharf; temperature; extra-long segment

板桩码头是码头三大结构形式之一, 其结构主要由板桩墙、拉杆、锚碇结构、导梁及帽梁等组成, 当潮差不大时可以将导梁及帽梁合并为胸墙^[1]。板桩码头配备轨道装卸机械时, 海侧轨道一般安装在桩基支撑的轨道梁上, 轨道梁与胸墙分开布置, 胸墙尺寸较小。随着板桩码头大型化的发展, 由钢管桩、钢板桩组合而成的管板组合板桩得到广泛应用, 该结构中钢板桩与钢管桩交

错布置, 板桩墙的抗弯、抗压能力都得到显著提高^[2], 海侧轨道梁可以利用板桩墙作为基础, 不必单独设置桩基, 因此轨道梁进一步与胸墙合并, 合并后的胸墙集成了常规板桩码头的导梁、帽梁及轨道梁 3 种功能, 结构设计要求较高。

对于常规板桩码头, 板桩墙断面类型单一, 胸墙分缝主要考虑与系船柱间距相适应, 变形缝通常设置在板桩接缝处, 变形缝间距一般采用

15~30 m。管板组合板桩码头中,板桩墙由钢板桩与钢管桩交错布置,变形缝的设置既要考虑钢板桩与钢管桩的间距,又要考虑其与系船柱间距相适应,因此相邻变形缝往往需要更大的间距。更为重要的是,为保证板桩码头结构具有良好的整体性、减少胸墙结构差异沉降或变形、解决结构缝处钢轨的破坏问题,并降低营运期的维护成本,在胸墙设计中希望尽可能采用长分段设计方案,分段长度往往远大于规范的30 m上限长度。

本文分析超长分段胸墙的结构受力特点,并将分析成果运用于广州港南沙四期板桩码头工程,成功采用百米长度分段的胸墙结构,分析成果及

应用经验可为类似工程提供借鉴。

1 工程概况

广州港南沙港区四期码头工程主要建设 2 个 10 万吨级集装箱泊位和 2 个 5 万吨级集装箱泊位。该段码头岸线总长 1 460 m, 码头结构均按靠泊 10 万吨级集装箱船设计, 设计底高程为 -16.0 m。码头结构采用管板组合板桩结构(图 1), 前墙采用 $\phi 2\ 032\text{ mm}$ 钢管桩与 Z 型钢板桩组合。组合板桩上部结构为现浇 C40 钢筋混凝土胸墙, 胸墙宽 5.0 m、高 3.7 m, 拉杆间距 3.35 m。板桩后根据地质情况进行水泥土搅拌桩二次加固处理, 墙后 1.0 m 以上回填泡沫轻质土。

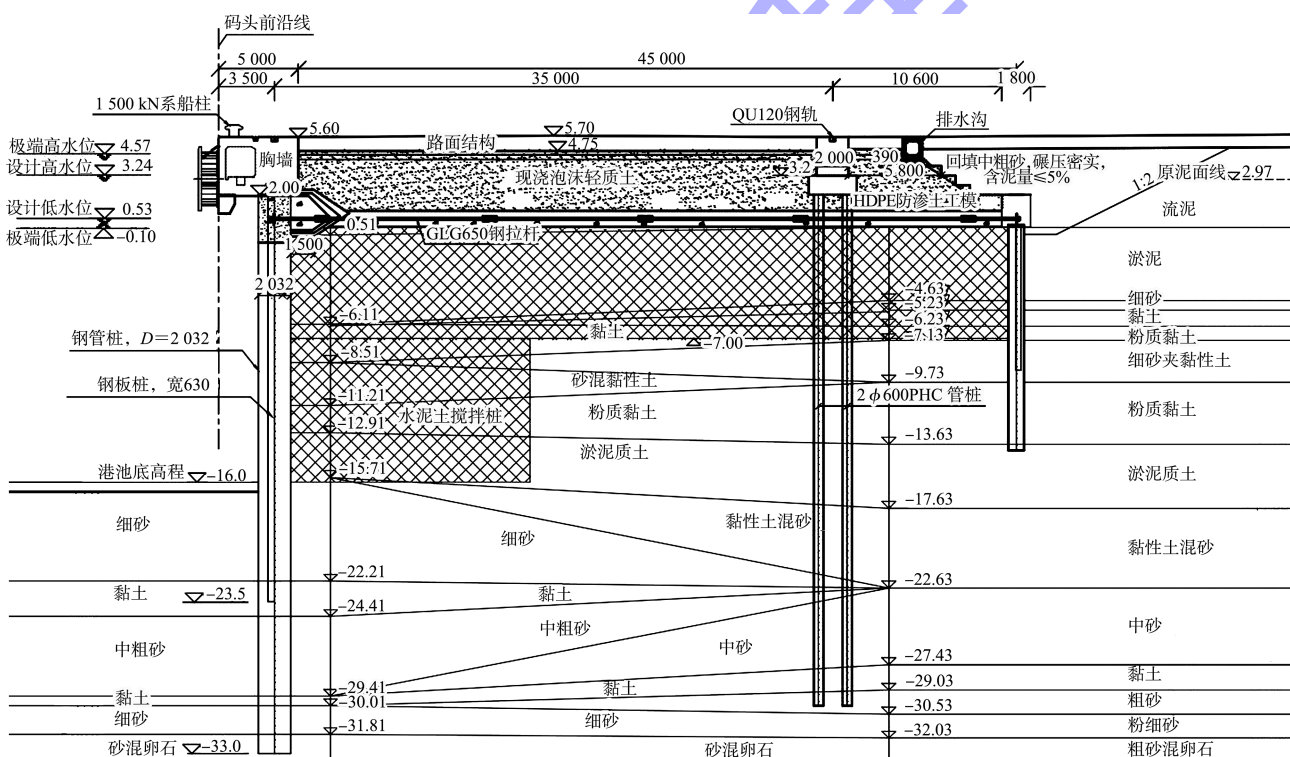


图1 南沙港区四期码头典型断面 (高程: m; 尺寸: mm)

码头前沿设置 2 条轨道, 轨距 35 m, 采用 QU120 钢轨, 前轨直接铺设在胸墙上, 后轨铺设于轨道梁上。海侧轨中心距码头前沿线 3.5 m, 基距 15.2 m, 支腿 4 个, 8 个轮/支腿, 平均轮距 1.328 m, 工作状态下最大轮压 920 kN, 非工作状态下最大轮压 1 470 kN, 两机联合作业时的最小间距为 1.5 m。码头采用

SC1250H 标准反力型橡胶护舷, 前沿布置 1 500 kN 系船柱。

南沙港区位于伶仃洋水域，当地多年平均气温 22.0℃，极端最高气温 38.2℃，极端最低气温 -0.5℃。各月的平均相对湿度在 71%~85%，多年平均相对湿度为 80%，相对湿度最小为冬季，历年最小为 5%。

2 胸墙荷载分析

本项目胸墙高 3.7 m、宽 5 m，集成了常规板桩码头中导梁、帽梁及轨道梁三者功能，受到多种荷载共同作用：水平方向受到船舶荷载及墙后土压力作用、竖直方向主要受到门机荷载作用、轴线方向主要受到温度及混凝土收缩作用。胸墙以板桩墙作为连续支撑，水平及竖直方向内力均较小，胸墙断面综合考虑轨道位置、管沟尺寸、钢管桩尺寸等因素，导致断面尺寸较大，因此常规荷载对胸墙的内力影响较小。胸墙采用超长分段后，混凝土的热胀冷缩、收缩、徐变等温度效应放大，引起较大的内力及裂缝，本文对此进行重点讨论。

2.1 环境温度应力

混凝土所处环境的温度变化会引起混凝土的热胀冷缩变形，由于混凝土变形受到结构的约束作用，导致产生了环境温度应力。水运工程规范未对环境温度计算作出详细规定，根据杨铭元等^[3]对超长无分缝高桩码头结构温度效应的计算分析，混凝土梁及桩基结构中均匀温差对构件内力变化起控制作用，梯度温差作用可忽略不计。本文只考均匀温差作用，依据 GB 5009—2012《建筑结构荷载规范》^[4]考虑以下工况：

1) 均匀温度作用分为结构最大温升工况和结构最大温降工况。

2) 结构最大温升工况下，温度作用标准值为：

$$\Delta T_k = T_{s,max} - T_{0,min} \tag{1}$$

式中： $T_{s,max}$ 为结构最高平均温度，按气温最高月平均温度取值，根据 GB 5009—2012 取 36 ℃； $T_{0,min}$ 为结构最低初始平均温度，按气温最高月平均温度取值，根据 GB 5009—2012 取 6 ℃。温度作用标准值 ΔT_k 为 30 ℃。

3) 结构最大温降工况下，温度作用标准值为：

$$\Delta T_k = T_{s,min} - T_{0,max} \tag{2}$$

式中： $T_{s,min}$ 为结构最低平均温度，按气温最低月平均温度取值，根据 GB 5009—2012 取 6 ℃； $T_{0,max}$ 为结构最高初始平均温度，按气温最高月平

均温度取值，根据 GB 5009—2012 取 36 ℃。温度作用标准值 ΔT_k 为-30 ℃。

2.2 混凝土收缩应力

收缩是混凝土材料固有的特性，也是引起混凝土开裂的主要原因之一，一般混凝土浇筑后 10~30 d 内完成的收缩量占总收缩量的 15%~25%，90 d 一般完成 60%~80%，1 a 后完成 95% 左右^[5]。混凝土收缩的影响因素有很多，主要为水泥的品种和用量、骨料、水灰比、空气温度、养护条件、钢筋用量等。混凝土收缩将在超静定结构中产生收缩应力，因此在对超静定结构进行设计计算时，通常将混凝土的收缩量等价转换为温度的降低值，称为混凝土收缩当量温差。目前国内对于混凝土收缩计算没有统一的方法，国内规范主要采用王铁梦^[6]提出的收缩模型以及欧洲混凝土规范模型^[7]，水运工程规范未明确如何计算混凝土收缩。本文按 GB 50496—2018 规范^[8]计算，该方法基于王铁梦的收缩模型，混凝土收缩的相对变形值按下式计算：

$$\varepsilon_y(t) = \varepsilon_y^0(t) (1 - e^{-0.01t}) M_1 M_2 M_3 \cdots M_{11} \tag{3}$$

式中： $\varepsilon_y(t)$ 表示龄期为 t 时，混凝土收缩引起的相对变形值； $\varepsilon_y^0(t)$ 为标准试验状态下混凝土最终收缩的相对变形值，取 4.0×10^{-4} ； M_1 、 M_2 、 M_3 、 \cdots 、 M_{11} 为混凝土收缩值不同条件影响修正系数，按规范附表取值。

混凝土收缩相对变形值的当量温度可按下式计算：

$$T_y(t) = \varepsilon_y(t) / \alpha \tag{4}$$

式中： $T_y(t)$ 表示龄期为 t 时混凝土的收缩当量温度； α 为混凝土的线膨胀系数，取 1.0×10^{-5} 。根据公式，计算得到混凝土的收缩当量温度为-31 ℃。

2.3 温差计算值

由于混凝土的收缩变形一直存在，温升时的变形与收缩变形有抵消作用，因此只考虑温降时的作用，温差计算值为环境温差与收缩当量温差之和，本工程取 61 ℃。

3 胸墙内力分析

3.1 建立有限元模型

根据本工程胸墙的特点, 建立有限元模型时采用梁单元模拟胸墙, 考虑到钢板桩刚度小, 忽略钢板桩作用, 胸墙仅考虑钢管桩支撑, 桩土之间的相互作用采用线性弹簧模拟, 弹簧刚度按 m 法取值。

常规板桩项目仅计算垂直于码头方向的桩土作用, 计算比较成熟, 平行于码头方向的桩土作用缺少研究, 本工程为管板组合板桩, 其特殊的构造导致平行于码头方向的桩土作用复杂: 1) 桩基受力状态与普通桩基差异很大。本工程钢管桩的中心距只有 1.5 倍桩径, 并且只有一半在土中, 相邻钢管桩与板桩将墙后填土分割, 钢管桩之间的土体形成三面约束状态, 其应力分布与普通板桩的墙后土体相差较大, 更有别于普通桩基, 土层深度对土体应力的影响减弱。2) 墙后软土采用水泥搅拌桩处理, 但施工时钢管桩周边的土体难以全面覆盖, 钢管桩周边仍存在一定厚度的软土。3) 钢板桩与钢管桩之间采用锁口连接, 钢管桩间距变小时两者之间的连接作用反而变小, 胸墙发生收缩变形后, 钢管桩间距变小, 钢板桩会向海侧变形, 相邻钢管桩之间的挤土作用会随着钢板桩的变形而减弱, 甚至抵消。

根据以上分析, 平行于码头方向钢管桩与土体之间的相互作用较小, 建模时未考虑港池泥面以上的桩土作用。为研究不同分段长度对结构的影响, 分别建立长度为 30、50、77、100 m 的 4 种胸墙模型。

3.2 结果分析

100 m 长分段胸墙的计算结果见图 2、3, 图 2 为胸墙轴心拉力, 呈抛物线分布, 中间大两边小, 最大轴心拉力为 2 580 kN; 图 3 为钢管桩弯矩, 分段中部弯矩小两侧弯矩大, 钢管桩的最大弯矩为 4 340 kN·m。

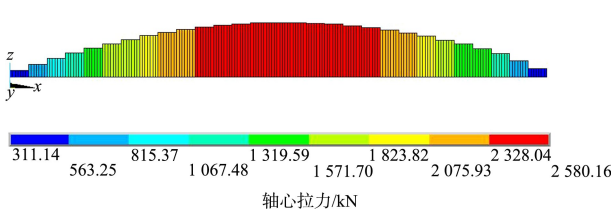


图 2 胸墙轴心拉力结果

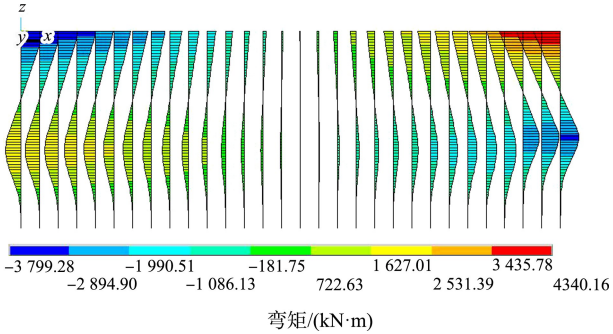


图 3 钢管桩弯矩结果

不同分段长度的计算结果见表 1, 由表 1 结果可见, 百米分段胸墙结构的内力远大于普通的 30 m 分段结果, 拉力相差 12 倍之多; 分段长度由小增大时, 胸墙位移呈线性增大趋势, 内力(胸墙轴力及桩顶弯矩)均呈非线性增大趋势, 分段长度越大内力增加越快。

表 1 不同胸墙分段长度的内力及位移结果

分段长度 L/m	胸墙轴心 拉力 N/kN	桩顶弯矩 $M/(\text{kN}\cdot\text{m})$	胸墙位移 s/mm	胸墙无约束时 的位移 s_0/mm
30	211	1 044	8.1	18.3
50	582	1 774	14.1	30.5
77	1 410	2 801	22.2	47.0
100	2 580	4 340	30.0	61.0

需要注意的是, 本工程计算时未考虑混凝土徐变影响, 胸墙在徐变的长期作用下最大轴心拉力将减小, 因此本工程的计算结果偏于保守。

4 项目实施情况

为保证胸墙混凝土耐久性、减少表面裂缝, 在胸墙混凝土中添加海港型抗腐蚀增强剂, 掺量为 36 kg/m^3 ; 表层的混凝土中添加聚乙烯醇抗裂纤维, 掺量为 0.9 kg/m^3 ; 抗裂纤维抗拉强度要求大于 270 MPa ; 公称长度 $6\sim 40\text{ mm}$ 。施工时采用分段浇筑, 分段长度为 $20\sim 30\text{ m}$ 。超长混凝土结构常采用后浇带技术解决混凝土收缩问题^[9], 本工程考虑到海水潮位影响及项目工期紧张等因素未予采用。

目前码头已经建成并运营超过 1 a, 胸墙表面裂缝较少, 未发现通长裂缝, 百米分段胸墙在板桩码头上得到成功运用。

5 结语

1)随着板桩码头大型化发展, 码头胸墙往往需要采用大于规范上限的分段长度, 广州港南沙四期板桩码头工程成功采用了百米长度分段的胸墙结构, 其分析成果及应用经验可为类似工程提供借鉴。

2)采用超长结构分段将导致混凝土的热胀冷缩、收缩、徐变等温度效应放大, 百米分段胸墙的结构内力远大于普通项目, 胸墙分段长度增大后位移呈线性变大趋势、内力呈非线性变大趋势, 分段长度越长内力增加越快。

3)考虑到管板组合板桩的特殊构造以及本工程地基处理的实际情况, 在平行于码头方向钢管桩与土体之间的相互作用较小, 因此计算时忽略了港池泥面以上的桩土作用, 该简化具有特殊性, 不一定适合其它工程。平行于码头方向的桩土作用影响胸墙的收缩应力, 现有研究并未涉及该领域, 有待进一步研究分析。

(本文编辑 武亚庆)

(上接第 123 页)

5 结语

1)钢筋混凝土轨道梁+水泥搅拌桩复合地基二次处理是一种合适的轨道基础方案。水泥搅拌桩处理方案具有造价适中、工艺成熟、处理后地基沉降和差异沉降较小的特点。

2)复合地基二次处理后的轨道地基沉降在 10 cm 以内, 可以通过可调节轨道协调不均匀沉降, 对港区的正常生产运营影响较小。

3)过路段轨道梁采用轨道板结构, 通过扩大基础宽度减小地基沉降; 在轨道基础两侧道路设置搅拌桩二次处理过渡段, 可以减小过路段地基沉降, 并保证道路与轨道差异沉降较小, 减少错台和跳车现象。

4)水泥搅拌桩复合地基是一种适用于广州港南沙港区自动化码头轨道地基处理的方案。

参考文献:

[1] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司. 码头结构设计规范: JTS 167—2018[S]. 北京: 人民交通出版社有限公司, 2018.

[2] 王福强, 李庭辉. 钢管板桩结构的特点及在深水码头中的应用[J]. 港工技术, 2010, 47(6): 24-26.

[3] 杨铭元, 张海荣. 超长无缝高桩码头结构温度效应分析研究[J]. 港工技术, 2019, 56(4): 64-67.

[4] 中国建筑科学研究院. 建筑结构荷载规范: GB 50009—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.

[5] 华旦, 吴杰, 干钢. 超长混凝土结构的温度应力分析与设计实践[J]. 建筑结构, 2012, 42(7): 56-59.

[6] 王铁梦. 工程结构裂缝控制[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.

[7] 程曦, 徐田雨, 陈勇. 国内外超长混凝土结构收缩模型比较[J]. 混凝土, 2014(9): 45-48.

[8] 中冶建筑研究总院有限公司. 大体积混凝土施工标准: GB 50496—2018[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.

[9] 郑晓芬, 艾靖儒, 程浩. 超长混凝土结构裂缝控制研究综述[J]. 结构工程师, 2021, 37(3): 235-242.

(本文编辑 武亚庆)

参考文献:

[1] 中交第二公路勘察设计院有限公司. 公路路基设计规范: JTG D30—2015[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2015.

[2] 中铁第一勘察设计院集团有限公司. 铁路路基设计规范: TB 10001—2016[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2017.

[3] 朱洪涛, 陈思周, 范莹莹. 青岛港某自动化集装箱堆场轨道基础设计研究[J]. 港工技术, 2018, 55(5): 108-111.

[4] 朱颖波, 王中, 陈明杰. 多种地基处理方法在曹妃甸煤码头续建工程的应用[J]. 水运工程, 2012(8): 172-176.

[5] 韩时捷, 王施恩, 周亚平. 双重可调式轨道基础研究与设计[J]. 水运工程, 2016(9): 126-129, 139.

[6] 周跃, 印莺, 唐勤华. 厦门远海全自动化集装箱码头改造示范工程[C]//自动化集装箱码头应用技术交流会议文集. 北京: 中国水运建设行业协会, 2015.

(本文编辑 武亚庆)