

· 施 工 ·



板桩码头地下结构施工工序分析

赵明时，田自民，申立明
(中交第一航务工程勘察设计院有限公司，天津 300222)

摘要：随着板桩码头地下结构施工工艺和成本的透明化，板桩码头在港口建设市场中的竞争力已经有所下降。结合京唐港 26[#]~27[#]集装箱泊位码头工程和以往工程的实践经验，提出板桩码头地下结构施工工序“时间”和“空间”的概念。通过分析环境、工艺条件和地下空间干扰 3 方面因素对施工工序的影响，得到：板桩码头施工工序的总体部署为“由简至繁，双线并行”；推导出渗流作用下槽壁稳定的计算公式，并提出“双线并行”施工的安全距离。

关键词：地下结构；施工工序；总体部署；槽壁稳定；安全距离

中图分类号：U 656.1+12 **文献标志码：**B **文章编号：**1002-4972(2015)12-0161-05

Construction process of sheet pile wharf’s underground structure
ZHAO Ming-shi, TIAN Zi-min, SHEN Li-ming
(CCCC First Navigational Engineering Design Institute of Co., Ltd., Tianjin 300222, China)

Abstract: As transparency of construction technology and cost of sheet pile wharf’s underground structure, competitiveness of sheet pile wharf is declined in the port construction market. Combining with 26[#] ~ 27[#] container terminal project and previous engineering experience, we puts forward the concept of “time” and “space” in the construction process of sheet pile wharf’s underground structure. Through impact analysis on three aspects which are construction environment, process conditions, underground space disturbance, we get to the conclusion that the overall deployment of sheet pile wharf construction process is “from simple to complicated & double-line parallel construction”; we also deduce a calculation formula of trench stability under seepage action and give the safe distance of two-line parallel construction.

Keywords: underground structure; construction process; overall deployment; trench stability; safe distance

我国港口建设以沉箱码头和高桩码头为主，而板桩码头是近些年兴起的码头结构形式（图 1），据不完全统计，建国 60 多年以来，建设板桩码头泊位 300 余个。但是经过了 60 年的建港，目前地基条件好的港址已经所剩无几，现在面临的将是大量在粉砂质海岸和淤泥质海岸建港，从长远的角度看，板桩码头发展前景较好^[1]。

对板桩码头而言，其地下结构的设计机理、数模计算、物模试验和施工实践是板桩码头区别于沉箱码头和高桩码头的核心要素，同时板桩码头造价和工期的优势也体现在板桩码头地下结构

中^[2-4]。但是从板桩码头自身发展状况来看，其地下结构的施工发展速度远滞后于设计机理、数模计算和物模试验的进展速度。

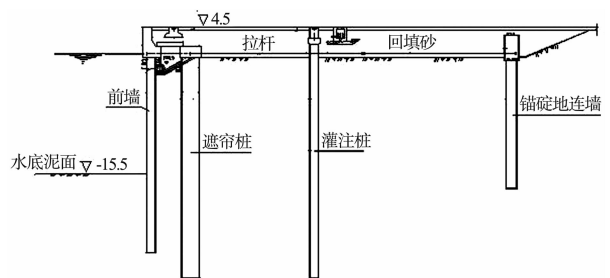


图 1 板桩码头结构断面（高程：m）

在提到施工发展时,工程技术人员往往关注于施工工艺的改进和施工机械性能的提升^[5]。板桩码头在历经多年的建设后,工程技术人员基本摸索出一套较为成熟的地连墙施工流程^[6](图2),单纯依靠板桩码头地下结构施工技术创新来体现板桩码头造价和工期的施工优势,已经不能满足现代板桩码头建设的要求。

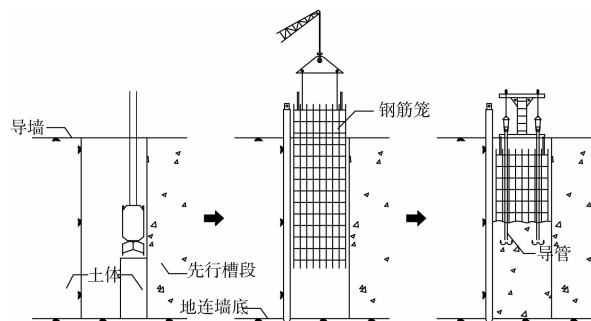


图2 地连墙施工流程

实际生产过程中,工程技术人员对板桩码头地下结构施工工序的研究常常局限于施工场地的平面布置,例如泥浆池的位置、用电的分配等。随着板桩码头吨位及施工岸线长度的增加,这种单靠平面布置对板桩码头地下结构施工顺序进行控制的做法暴露出许多问题,例如人机效率低、成本增加,甚至会出现槽段坍塌的质量事故等。

综上,在国家新的政治和经济形势下,板桩码头的发展受到新的挑战,为了保持板桩码头在技术创新进入相对稳定期后的可持续增长,板桩码头地下结构施工必须整合影响项目运行的各个主导因素,在复杂多变的港口建设市场中,谋求更大的项目效益。

1 工程背景

1.1 工程概况

唐山港京唐港区26[#]~27[#]集装箱泊位码头工程位于三港池南岸东段,根据建设规模,本工程施工内容为10万吨级全遮帘桩式地连墙板桩结构码头,主体结构段690 m,西侧过渡段79.8 m,东侧过渡段78.6 m,总长848.4 m。地下结构主要工程量:前墙158片,锚碇墙159片,遮帘桩

312根,灌注桩180根,水下部分混凝土约6.5万m³,钢筋制安约9700 t。

1.2 地质条件

码头区自上而下依次为:冲填土、①₁粉细砂、①₂粉土、②₁粉质黏土、②₂黏土、②₃粉质黏土、③₁细砂和④₁细砂。

1) 表层冲填土呈松散-密实状,土层工程性质较差,导墙和护筒埋置在该层;2) ①₁粉细砂呈稍密状,局部为松散状,该层土质不均匀;3) ②₁粉质黏土、②₂黏土和②₃粉质黏土均属于海相沉积形成,为该区域软弱土层,工程土质特性差;4) -28.25~-31.87 m 细砂平均标贯击数 $N=49.7$ 击,土层较硬。

2 施工工序的影响因素

2.1 施工工序

板桩码头地下结构施工工序分为纵向施工工序和横向施工工序,纵向施工工序就是传统意义上的施工流程。这里所说的板桩码头地下结构施工工序指的是横向施工工序,即前墙、锚碇墙、遮帘桩和灌注桩施工的总体部署。从施工内容上看,这4个施工内容属于独立的分部工程,但是大量板桩码头工程实践表明,这4个分部工程之间相互联系,如果割裂了它们之间的联系,势必会对施工质量、安全和进度造成不良影响。

对板桩码头地下结构施工而言,存在“时间”和“空间”两个概念。简单理解,“时间”就是施工内容的先后顺序和持续时间,而“空间”就是施工所包含内容的数量、大小和位置等。施工工序同时涉及“时间”范畴和“空间”范畴。单从施工成本考虑,压缩“时间”或“空间”意味着以更小的代价获得更大的利益。因此,本研究以唐山港京唐港区26[#]~27[#]集装箱泊位码头工程为依托,同时借鉴其它板桩码头地下结构施工的成功经验和失败教训,提出对板桩码头地下结构施工工序的探讨。

2.2 环境对施工工序的影响

这里所说的环境指的是人的适应性和机械设

备的运行状况等影响因素。对于新建项目而言,即使具有丰富的实践经验,也需要一个认识和理解的过程,特别是施工一线的操作人员,如果要熟练进行某项施工作业必须经过一段时间的适应,包括心理、认知水平和操作能力等。同样,施工机械设备也需要一个检修和调试的磨合过程,例如液压抓斗、旋挖钻机和混凝土搅拌设备等。如果施工伊始,人员和机械设备就直接进入高强度和高负荷运转状态,违背了事物发展的客观规律,达不到预期的施工效果,甚至会发生人员伤亡或者机损事故。

从施工工艺方面来看,前墙、锚碇墙、遮帘桩和灌注桩施工工艺几乎相同(图 2),只是各个分部工程的断面形状和工程量等有所不同而已(图 1、表 1)。对于本工程 848.4 m 的施工岸线而言,锚碇墙和灌注桩的工程量(钢筋和混凝土)要明显少于前墙和遮帘桩的工程量,也就是说锚碇墙和灌注桩的施工相对较为简单,因此本工程在安排施工工序时考虑到人和机械设备等环境因素,首先进行锚碇墙或灌注桩施工,然后再进行遮帘桩施工,最后进行前墙施工,这也体现了“由简至繁”的人类认识事物的一般规律。

表 1 地下结构主要工程量		
项目	混凝土方量/ m ³	钢筋量/t
前墙	24 000	4 500
遮帘桩	20 000	2 800
锚碇墙	11 000	1 600
灌注桩	10 000	800
合计	6 500	9 700

2.3 工艺条件对施工工序的影响

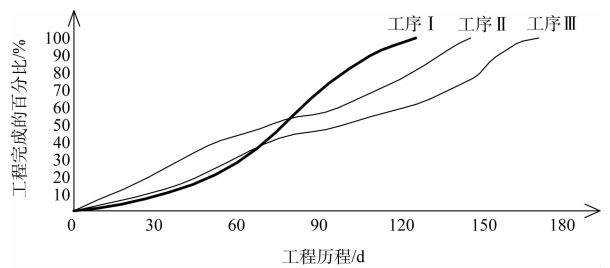
任何一项工艺都离不开相应的工艺条件,对板桩码头地下结构来说,工艺条件指的是泥浆、吊车和电路等影响施工作业的各种施工因素。在研究板桩码头地下结构施工,特别是地连墙施工时,工程技术人员对泥浆、吊车和电路等工艺条件的研究更多着眼于某项工艺条件自身的技术参数^[7],例如泥浆性能研究、钢筋笼吊装计算、施工用电设计等,而忽略了该项工艺条件在施工工

序中的整体作用。

板桩码头地下结构具有前墙、锚碇墙、遮帘桩和灌注桩 4 个分部工程,如果每个分部工程单独进行施工,不利于施工流水作业,影响施工总工期,同时也不利于施工成本的控制。由于施工难易度和工程量的差异性较大,遮帘桩(或前墙)的施工速度要远滞后于锚碇墙(或灌注桩)的施工速度。如果锚碇墙(或灌注桩)和遮帘桩(或前墙)同时施工,会带来许多工艺条件方面问题。首先,泥浆循环系统总距增加,也就是说增加了泵送泥浆的难度和成本;其次,吊车作为大型移动起吊设备,其行走距离大大增加,势必会造成吊车使用效率的降低;再者,电路总距增加,意味着电损的增加,同时施工时要购买更多的电缆,增加了施工成本;另外,这种施工工序会直接影响后期锚碇墙导梁和胸墙的施工工期。

因此,从工艺条件对施工工序的影响考虑,板桩码头地下结构施工时采用“双线并行”的施工策略对施工工序进行总体部署,即锚碇墙和灌注桩这两条线路同时进行施工,而遮帘桩和前墙这两条线路同时进行施工。

本工程地下结构施工工序采用“由简至繁,双线并行”的总体部署构思,将板桩码头地下结构各个分部工程作为一个有机的整体进行再调整,有效压缩了施工的“时间”和“空间”,见图 3。从图 3 可以看出本工程锚碇墙和灌注桩“双线先行”,遮帘桩和前墙“双线后行”,施工工期至少缩短 20 d,施工成本至少降低 16%。



注: 工序 I 为锚碇墙和灌注桩“双线先行”, 遮帘桩和前墙“双线后行”; 工序 II 为遮帘桩和前墙“双线先行”, 锚碇墙和灌注桩“双线后行”; 工序 III 为锚碇墙和遮帘桩“双线先行”, 灌注桩和前墙“双线后行”。

图 3 不同工序下工程管理曲线

2.4 地下空间干扰对施工工序的影响

在安排“双线并行”的施工工序时除了要考虑平面布置的相互影响,还要考虑“双线并行”施工时地下空间的干扰问题,特别是液面落差较大的灌注桩施工时容易引起土体失稳、出现塌方。

1) 单元土体稳定分析^[8]。

本工程所在土体为吹填后形成的陆域,“后线”槽壁失稳断面可以视为有渗流作用的各向同性的无黏性土坡,因受到“前线”渗透水流的作用,“后线”所在土体滑动力加大、抗滑力减小。自坡面上取一单元土体(图4),土体内摩擦角为 φ ,坡角为 β ,土体浮密度为 ρ' ,泥浆密度为 ρ_b ,水的密度为 ρ_w 。

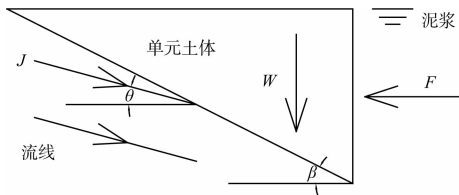


图4 渗流作用下单元土体稳定分析

土体重力为 W ,其沿坡分力

$$W_1 = \rho' g \sin \beta \tag{1}$$

法向分力 $W_2 = \rho' g \cos \beta$ (2)

渗流的渗透力为

$$J = i \rho_w g \tag{3}$$

其沿坡分力 $J_1 = i \rho_w g \cos(\beta - \theta)$ (4)

法向分力 $J_2 = i \rho_w g \sin(\beta - \theta)$ (5)

式中: i 为渗透水力坡降; θ 为渗流方向与水平面的夹角。

泥浆支撑力为 $F = \rho_b g$,其沿坡分力

$$F_1 = \rho_b g \cos \beta \tag{6}$$

法向分力 $F_2 = \rho_b g \sin \beta$ (7)

单元土体下滑力为 $T = W_1 + J_1 - F_1$ (8)

单元土体下滑阻力

$$T_f = (W_2 - J_2 + F_2) \tan \varphi \tag{9}$$

土体单元在 W 、 J 和 F 共同作用下保持平衡^[9],故其稳定系数为

$$K = \frac{T_f}{T} = \frac{[\rho' g \cos \beta - i \rho_w g \sin(\beta - \theta) + \rho_b g \sin \beta] \tan \varphi}{\rho' g \sin \beta + i \rho_w g \cos(\beta - \theta) - \rho_b g \cos \beta} \tag{10}$$

2) 灌注桩和锚碇墙土体稳定性分析。

灌注桩施工时,水文地质条件对土体单元稳定的影响认为是不变的,即认为 ρ' 、 β 、 θ 和 φ 值为常量;而影响土体单元稳定的变化因素主要有 i 和 ρ_b 。如图5所示, i 主要由锚碇墙泥浆液面和渗流路径决定($i = \Delta h / L$),而 ρ_b 主要由灌注桩泥浆液面决定。

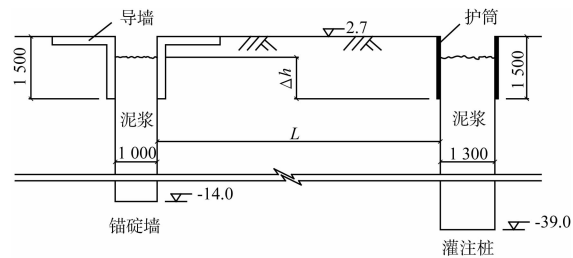


图5 土体稳定的影响因素(高程:m,尺寸:mm)

根据灌注桩槽壁失稳情况来看,平面上距离护筒3 m范围的土体出现断裂,立面上与长度为1.5 m护筒接触的土体首先遭到破坏,因此认为 $\beta = 26.57^\circ$ 。由于锚碇墙导墙与灌注桩护筒底高程相同,可以认为渗流的流线与水平面的夹角 $\theta = 0^\circ$ 。吹填砂的内摩擦角 $\varphi = 30^\circ$ 。 $\rho' = 1.1 \text{ t/m}^3$, $\rho_w = 1.0 \text{ t/m}^3$ 。

灌注桩施工时,旋挖钻头离开液面后,液面会突然下降1 m左右,如果泥浆补充不及时,会造成泥浆液面较长时间低于护筒底高程,即 $\rho_b = 0$ 。此情况下最易发生塌槽现象,经计算,若 $K > 1$,则 $i < 0.083$ 。一般情况下,泥浆液面低于导墙顶0.5 m,即 $\Delta h = 1 \text{ m}$ 。从而得出锚碇墙导墙内泥浆对灌注桩施工影响的安全距离 $L > 12 \text{ m}$ 。

将计算结果和施工现场实际情况结合起来,可以看出:1)本工程所在表层冲填土及其下部土层呈松散-密实状,土层工程性质较差,在这些土层中泥浆渗漏较快,也就是说灌注桩泥浆液面下降较快;另外,根据灌注桩施工特点,在提升旋挖钻头时泥浆液面落差较大,容易造成补浆不及时的情况发生,这些都会造成 ρ_b 偏低。2)根据锚碇墙施工的特点,30~40 m范围的锚碇墙导墙内充满了泥浆。灌注桩施工时如果附近的锚碇墙导墙内依然充满了泥浆,加之灌注桩距离锚碇墙不

足 7 m, 极易产生较大的渗流作用。当灌注桩槽壁内的泥浆不足以平衡槽壁外的土压力和水压力(包括渗透力)时, 泥浆护壁效果遭到破坏, 导致灌注桩塌孔现象发生。

3) 前墙和遮帘桩土体稳定性分析。

对于前墙和遮帘桩施工而言, 30 ~ 40 m 范围内导墙充满了泥浆, 液压抓斗提出液面时, 二者的泥浆液面都不会产生大幅度下降, 即 $\rho_b = 1.1 \text{ t/m}^3$ 。此时若 $K > 1$, $i < 1.46$, 从而 $L > 0.68 \text{ m}$ 。本工程遮帘桩和前墙间距为 3 m, 也就是说前墙和遮帘桩不易产生渗流影响。

将计算结果和施工现场实际情况结合起来, 可以看出: 虽然土层工程性质较差, 并且遮帘桩和前墙的间距较小, 但是根据遮帘桩和地连墙施工的特点, 在提升液压抓斗斗体时泥浆液面起伏不大, ρ_b 偏于稳定。遮帘桩(或地连墙)即使在一个断面施工, 其各自槽壁内的泥浆足以平衡槽壁外的土压力和水压力, 槽壁不易发生失稳。

综上, 遮帘桩和前墙之间的地下空间干扰较小, 而灌注桩和锚碇墙之间的地下空间干扰较大。灌注桩施工要避开锚碇墙施工对其地下空间干扰的影响区域, 至少要保证灌注桩施工 12 m 范围内锚碇墙导墙内不存在泥浆。因此, 锚碇墙施工完成后, 需要将导墙内残留的泥浆及时排出并回填泥土, 这样既减少了对后续灌注桩施工的负面影响, 又降低了人员通过锚碇墙导墙时坠入泥浆的风险。

3 结语

1) 通过对地下结构施工工序的研究, 提出“由简至繁、双线并行”的施工工序总体部署, 一方面保证了传统地连墙施工工艺的完整性, 满足了质量和安全的要求; 另一方面将板桩码头地下结构的各个分部工程有序衔接起来, 压缩了板桩码头地下结构施工的“时间”和“空间”, 避免

了资源的浪费, 达到了缩短工期、节约成本的目的, 增强了板桩码头在港口市场的竞争力。

2) 推导出“双线并行”施工时渗流作用对槽壁稳定影响的计算公式, 渗流作用对槽壁稳定影响与“并行”施工时的施工条件有关, 可供工程技术人员安排施工工序时参考。

3) 结合工程实践, “双线并行”施工时, 适当保持锚碇墙和灌注桩之间的施工距离是必要的, 既减少了“双线并行”的平面干扰, 节省了施工成本和工期; 又降低了灌注桩施工时槽壁坍塌的风险, 确保了施工质量和安全。

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. 板桩码头和地下连续墙码头的设计理论和方法[M]. 北京: 人民交通出版社, 2006.
- [3] 李景林, 王剑平, 蔡正银, 等. 遮帘桩方案改造板桩码头离心模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(8): 978-982.
- [4] 李景林, 蔡正银, 徐光明, 等. 遮帘式板桩码头结构离心模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(6): 1 182-1 187.
- [5] 陈日胜, 周翰斌. 上软下硬地层超深 T 形地连墙成槽施工难题的处理[J]. 水运工程, 2011(11): 232-236.
- [6] JTJ 303—2003 港口工程地下连续墙结构与施工规程[S].
- [7] 王云岗, 章光, 胡琦. 钻孔灌注桩孔壁稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(S1): 3 281-3 287.
- [8] 武俊东, 丁文其, 刘文军. 渗流作用对多支点地下连续墙嵌固深度的影响分析[J]. 岩土工程学报, 2012(S1): 54-59.
- [9] 邵龙潭, 刘士乙. 基于极限平衡条件的土体局部稳定分析[J]. 西北地震学报, 2011, 33(3): 209-211.

(本文编辑 武亚庆)