

· 港口 ·



## 地下连续墙板桩结构中长期变形特性研究\*

王琳<sup>1,2</sup>

(1. 天津大学 建筑工程学院, 天津 300350; 2. 国投中煤同煤京唐港口有限公司, 河北 唐山 063600)

**摘要:** 针对地下连续墙板桩结构码头结构中长期变形问题, 以唐山港京唐港区 10 万吨级遮帘式地下连续墙板桩码头结构工程为依托, 采用原型观测方法, 研究遮帘式地下连续墙板桩结构施工期和运行期的中长期变形特性, 得出前地连墙、遮帘桩、锚碇墙在不同开挖阶段和运行期结构变形和锚碇点位移。结果表明: 遮帘式地下连续墙板桩码头结构施工期浚深到设计高程附近, 结构水平位移变化速率最大, 累计水平位移占比 80%~93%, 锚碇点累计位移占比 85%~91%, 码头前沿浚深对水平位移影响非常敏感, 尤其是浚深到设计值附近。依托工程的遮帘式地下连续墙板桩码头结构变形稳定时间大约为 7 a。

**关键词:** 地下连续墙板桩码头; 中长期; 变形和内力; 原型观测; 数值仿真

中图分类号: U656.1+12

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2026)01-0069-09

### Medium to long-term deformation characteristics of underground diaphragm wall sheet pile structure

WANG Lin<sup>1,2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China;

2. SDIC Zhongmei Tongmei Jingtang Port Co., Ltd., Tangshan 063600, China)

**Abstract:** To address the medium to long-term deformation issues of underground diaphragm wall sheet pile wharf, we focus on the 100,000-ton-class curtain-type underground diaphragm wall sheet pile wharf project at Jingtang port area of Tangshan Port. Using prototype observation method, we investigate the medium to long-term deformation characteristics of the curtain-type underground diaphragm wall sheet pile structure during both the construction period and operational period, and obtain the structural deformation and anchor point displacement of the front diaphragm wall, curtain piles, and anchorage wall at different excavation stages and during operation period. The results demonstrate that the rate of change in horizontal displacement of the structure is greatest during the construction period of the curtain-type underground diaphragm wall sheet pile wharf structure dredged deep to near the design elevation. The cumulative horizontal displacement accounts for 80%–93%. The cumulative displacement of the anchor points accounts for 85%–91%. The dredging depth at the front of the wharf is highly sensitive to horizontal displacement, especially when it approaches the design value. The deformation stabilization time of the curtain-type underground diaphragm wall sheet pile wharf structure is approximately 7 years in the relied project.

**Keywords:** underground diaphragm wall sheet pile wharf; medium to long-term; deformation and internal force; prototype observation; numerical simulation

港口码头结构的设计寿命在实际使用中因复杂因素的叠加, 如码头后方超载、码头前沿疏浚

清淤, 外加日益频发的极端气候和灾害等, 导致地下连续墙板桩码头结构<sup>[1-5]</sup>内力和变形的持续变

收稿日期: 2025-04-25 录用日期: 2025-05-14

\*基金项目: 国家自然科学基金青年项目(51309087)

作者简介: 王琳(1989—), 男, 工程师, 研究方向为防灾减灾工程与防护工程。

化,发展到一定程度可能会对结构的中长期变形和内力性能产生影响,严重时可能造成结构的开裂甚至破坏,影响结构的使用寿命。因此研究码头结构变形对结构安全和使用寿命极其重要,尤其是基于原型观测探索码头结构在中长期过程中的变形特性。

在码头结构原型观测的相关研究中,焦志斌等<sup>[6]</sup>基于国内外首个全遮帘式板桩码头工程实践,进行现场测试和原位试验,探讨监测仪器设备的选型和安装埋设要求,研发成套的遮帘式板桩码头原型观测技术,建立了技术标准;郭继业等<sup>[7]</sup>基于深水遮帘式板桩码头结构内的测试元件,对各种短期工况下位移、内力进行原位观测,分析结构相应特性的变动规律;李利军等<sup>[8]</sup>基于原型观测数据推算分析出拉杆压力、地下连续墙和遮帘桩的水平位移、混凝土应变和弯矩情况;吕林皓等<sup>[9]</sup>通过对沿海港口码头设施的长期变形及内力进行观测,论述码头整体结构性能的长期变化规律;吴锋等<sup>[10]</sup>针对地下连续墙板桩码头结构的特点及其主要施工工艺,进行原型观测研究,通过不同施工阶段的监测数据,指出板桩结构在实际应用中表现出良好的力学性能,但其沉降和位移情况值得特别注意,以确保港口设施的安全性和稳定性;Ding等<sup>[11]</sup>结合实际工程对地下连续墙板桩结构施工期原型观测资料进行分析,针对相同条件下不同土层深度的板桩码头结构设计要素,布置相关监测设备监测其内力和变形,进而指导施工;Zhang等<sup>[12]</sup>将数值模拟和原型观测以及离心机试验相结合分析桩长度、墙桩间距、桩净间距等参数对阻断效果的影响,结果表明不同参数值所引起的阻断效果有所差异。目前,国内外学者基于原型观测对码头结构进行的相应研究还是较少。

码头结构中长期研究的案例也很有限,如李沛等<sup>[13]</sup>指出码头结构在长期使用过程中材料会逐渐劣化,相应的结构内力也会发生改变;吴锋等<sup>[14]</sup>对高桩码头中长期内力变形监测进行研究,所得结果为码头的安全运营提供了决策依据;Bi等<sup>[15]</sup>提

出码头结构长期监测的新型数字孪生系统构建方法,并证明该方法的有效性。

由以上分析可知,此前虽有少量研究通过单一的原型观测或中长期内力分析策略研究码头结构的变形,但鲜有基于原型观测分析码头结构在中长期过程中的变形特性。因此,本文依托唐山港京唐港区10万吨级遮帘式地下连续墙板桩码头结构工程,基于中长期原型观测,对地下连续墙板桩结构中后期变形特性进行深入研究。研究结果可为遮帘式地下连续墙板桩码头结构的维护与管理提供科学依据,对保障港口中长期安全运营具有重要技术支撑。

## 1 工程概况

京唐港32#泊位为1座10万吨级的专业化煤码头,按照JTS 167-3—2009《板桩码头设计与施工规范》<sup>[16]</sup>,传统前板桩墙厚度需要1.5 m以上,这就导致前板桩墙刚度较大,引起结构变位和拉杆力涨幅过大等难题。根据其工程地质、地形等条件采用遮帘式地下连续墙板桩结构。设计时在前墙后面布设1排遮帘桩并同时兼作轨道梁基础,有效分担一部分土压力,满足深水泊位的结构要求。

码头前墙为钢筋混凝土地下连续墙,厚度1.0 m,墙底和墙顶高程分别为-28.5和0.0 m,其上部为钢筋混凝土胸墙。遮帘桩截面长1.0 m、宽2.0 m、中心间距2.75 m,底部和桩顶高程分别为-32.0和0.0 m。锚碇墙为钢筋混凝土地下连续墙,距离前墙40.0 m,厚度1.2 m,墙底高程-18.0~-15.0 m,墙顶高程-0.5 m,上部钢筋混凝土导梁高程3.0 m。前墙与遮帘桩之间为Q345 $\phi$ 75 mm钢拉杆,遮帘桩与锚碇墙之间为Q345 $\phi$ 95 mm钢拉杆。

## 2 观测方案

由于研究结构为遮帘式地下连续墙板桩码头,尚无技术规范和建设经验,结构参数以土工离心模型试验和数值模拟计算确定。

通过在前地下连续墙、遮帘桩以及后锚碇墙3个部位内埋设测斜管,观测施工期和运行期的前

地下连续墙、遮帘桩和锚碇墙的侧向变形和变化情况。根据桩体和墙体侧向变形数据，计算出结

构的锚碇点位移。原型观测设置 2#~4# 共 3 个断面，见图 1。

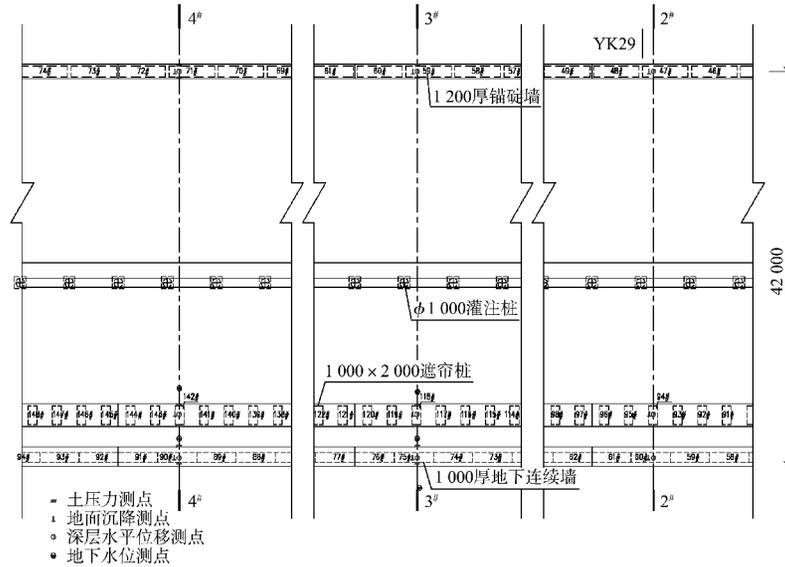


图 1 原型观测断面布置 (单位: mm)

Fig. 1 Section layout for prototype observation (unit: mm)

前墙、遮帘桩、锚碇墙结构钢筋笼制作过程中，同步安装测斜管，管口覆盖保护盖。测斜管采用专用铝合金材料，具有良好的延性。制作钢筋笼时，将测斜管依照设计方向固定在钢筋笼上并调整导槽方向，待钢筋笼放入导槽浇筑混凝土。测斜管安装现场见图 2。

观测。观测结果表明，仪器安装埋设阶段前地下连续墙、遮帘桩和锚碇墙均无侧向变形。

码头前沿浚深挖泥时间为 2005 年 6—12 月，挖泥高程 -16.0 m，分为 -10 m、-15~-10 m、-16~-15 m 共 3 个阶段。2007 年 9 月，完成码头上部设备安装调试。本文观测时间截至 2020 年 11 月，历时 16 a，其中码头施工期 3 a，运行期 13 a。

观测时每个测点正反方向各测 1 次，测点间距 0.5 m，正反方向测量误差小于 5%。

### 3.1 施工期

2004 年 8 月—2007 年 9 月为施工期观测时间，观测时间约 3 a。

#### 3.1.1 结构侧向变形

施工期结构在各个阶段的最大水平位移值及最大水平位移增加值见表 1，最大水平位移占比见表 2。施工期包含码头前沿浚深挖泥 3 个阶段和码头上部设备安装调试阶段，共 4 个阶段。前墙结构各阶段侧向变形分布情况见图 3，遮帘桩结构各阶段侧向变形分布情况见图 4，锚碇墙结构各阶段侧向变形分布情况见图 5。



图 2 测斜管安装现场

Fig. 2 Installation site of inclinometer tubes

### 3 观测结果

于 2004 年 8 月—2005 年 2 月进行观测仪器安装与埋设。码头前沿浚深挖泥前进行超 70 组次的

表 1 施工期各阶段最大水平位移及位移增加值

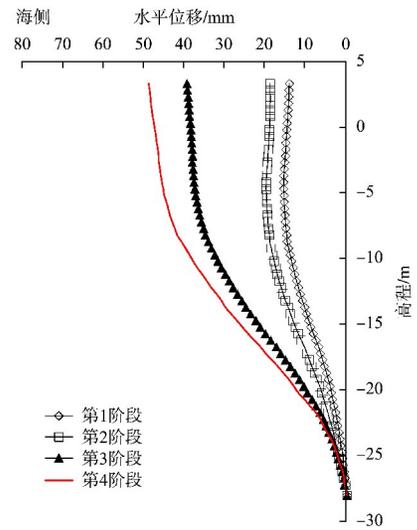
Tab. 1 Maximum horizontal displacement and displacement increase value during construction stages

结构名称	断面	各阶段最大水平位移/mm				各阶段最大水平位移增加值/mm			
		阶段 1	阶段 2	阶段 3	阶段 4	阶段 1	阶段 2	阶段 3	阶段 4
前地下连续墙	2#	12	19	58	65	-	7	39	7
	4#	14	19	39	49	-	5	20	10
遮帘桩	2#	12	23	59	65	-	11	36	6
	3#	13	20	46	53	-	7	26	7
锚碇墙	2#	7	17	54	63	-	10	37	10
	4#	8	13	40	43	-	5	27	3

表 2 施工期各阶段最大水平位移占比

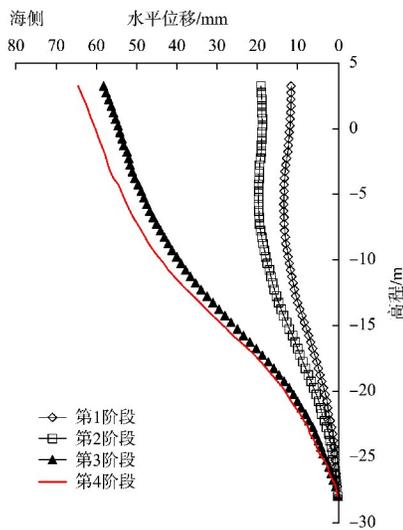
Tab. 2 Proportion of maximum horizontal displacement during construction stages

结构名称	断面	各阶段最大水平位移占比/%			
		阶段 1	阶段 2	阶段 3	阶段 4
前地下连续墙	2#	18	11	60	11
	4#	29	10	41	20
遮帘桩	2#	18	17	55	9
	3#	25	13	49	13
锚碇墙	2#	11	16	58	16
	4#	19	12	63	7

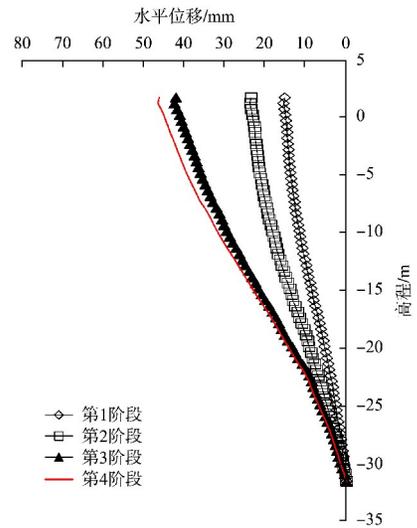


b) 4#断面

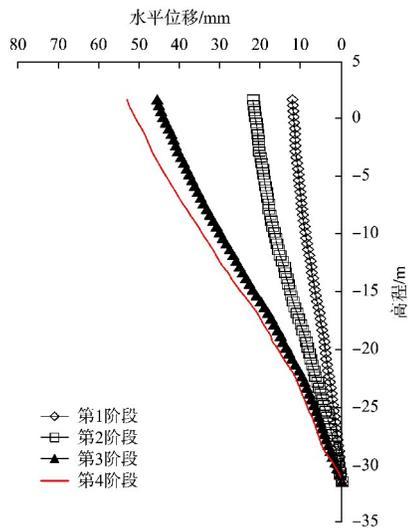
图 3 施工期前墙水平位移分布  
Fig. 3 Horizontal displacement distribution of front wall during construction period



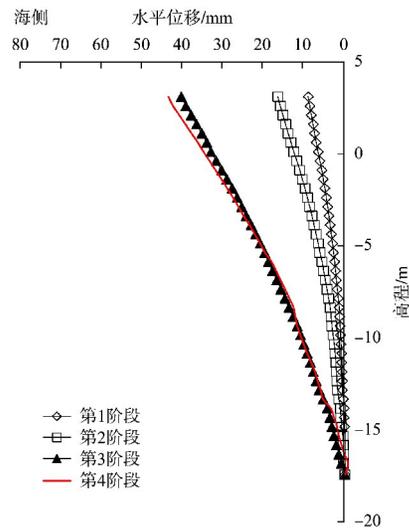
a) 2#断面



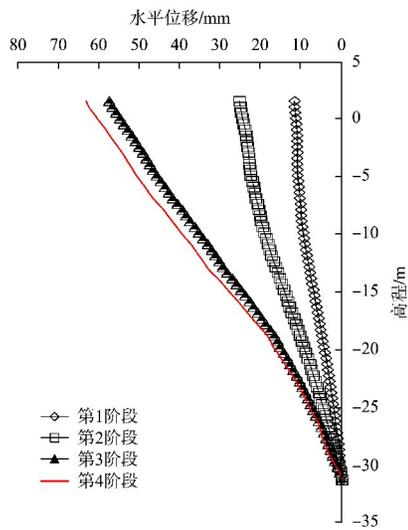
a) 2#断面



b) 3#断面

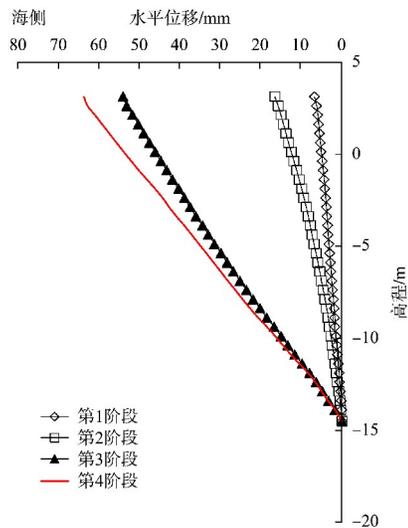


b) 4#断面



c) 4#断面

图 4 施工期遮帘桩水平位移分布  
Fig. 4 Horizontal displacement distribution of curtain piles during construction period



a) 2#断面

图 5 施工期锚碇墙水平位移分布  
Fig. 5 Horizontal displacement distribution of anchorage wall during construction period

施工期观测结果表明：1) 码头施工期各断面前墙、遮帘桩位移值非常接近，锚碇墙位移值明显滞后于前墙、遮帘桩，但施工期末与前墙和遮帘桩移值接近。2) 码头施工期第 1 阶段的结构水平位移占比 11%~31%；码头施工期第 2 阶段的结构水平位移占比 9%~17%；码头施工期第 3 阶段的结构水平位移占比 41%~63%；码头施工期第 4 阶段的结构水平位移占比 7%~20%。因此码头前沿浚深-16~-15 m 阶段，需要严格控制浚深速率，防止结构产生过大变形。3) 码头前沿浚深至-10 m，结构水平位移占比 11%~31%；码头前沿浚深至-15 m，结构水平位移占比 27%~40%；码头前沿浚深至-16 m (设计值)，结构水平位移占比 80%~93%。因此码头前沿浚深对结构水平位移影响非常敏感，尤其是浚深到设计值附近，严禁超深疏浚，并须考虑超深疏浚对结构变形的影响，同时制定防控措施。4) 2#锚碇墙底高程-15.0 m，4#锚碇墙底高程-18.0 m，两者墙体入土深度相差 3 m。但相对于 4#锚碇墙，浚深阶段 2#锚碇墙最大水平位移增大 35%，施工期 2#锚碇墙最大水平位移增大 49%，表明锚碇墙设计时应充分考虑入土深度，可显著减小锚碇墙变形。

### 3.1.2 结构锚碇点位移

锚碇点位移是指拉杆高程部位的结构水平位移, 本文工程中为结构高程-0.5 m 处的水平位移, 包括前墙锚碇点位移、遮帘桩锚碇点位移、锚碇墙锚碇点位移。

前墙与帘桩锚地位移差直接代表了拉杆的工作状态, 揭示前墙与遮帘桩之间的拉杆伸长量(不

考虑拉杆扰度的影响), 对桩墙弯矩的分布有着重要影响。所以可知锚碇点位移对于遮帘式地下连续墙板桩码头结构极其重要。

施工期各阶段锚碇点最大位移及位移增加值见表 3, 位移占比见表 4。施工期各结构锚碇点位移见图 6。

表 3 施工期各阶段锚碇点最大位移及位移增加值

**Tab. 3 Maximum displacement and displacement increase value of anchor point during construction stages**

结构名称	断面	各阶段锚碇点最大位移/mm				各阶段锚碇点最大位移增加值/mm			
		阶段 1	阶段 2	阶段 3	阶段 4	阶段 1	阶段 2	阶段 3	阶段 4
前地下连续墙	2#	11	19	55	62	-	8	36	7
	4#	11	19	42	47	-	8	23	5
遮帘桩	2#	9	20	56	62	-	11	36	6
	3#	9	19	44	51	-	10	25	7
	4#	10	19	42	46	-	9	23	4
锚碇墙	2#	4	13	48	53	-	9	35	5
	4#	5	13	34	40	-	8	21	6

表 4 施工期各阶段锚碇点最大位移占比

**Tab. 4 Proportion of maximum displacement of anchor point during construction stages**

结构名称	断面	各阶段锚碇点最大位移占比/%			
		阶段 1	阶段 2	阶段 3	阶段 4
前地下连续墙	2#	18	13	58	12
	4#	23	17	49	11
遮帘桩	2#	15	18	58	10
	3#	18	20	48	14
	4#	22	20	49	9
锚碇墙	2#	11	16	58	16
	4#	19	12	63	7

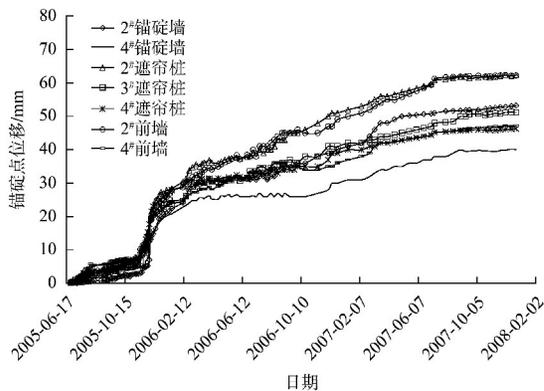


图 6 施工期锚碇点位移

Fig. 6 Anchor point displacement during construction period

由表 3、4 和图 6 可看出: 1) 码头施工期各断面前墙、遮帘桩锚碇点位移值非常接近, 一

定时间段前墙锚碇点位移值略大于遮帘桩。锚碇墙锚碇点的位移值显然较前墙和遮帘桩的位移产生滞后现象, 且锚碇点在施工期末的位移值比前墙、遮帘桩更小。表明前墙和遮帘桩之间的拉杆相比遮帘桩和锚碇墙之间的拉杆扰度影响更大。因此, 拉杆安装时需要施加特定的预应力, 而遮帘桩和锚碇墙之间的拉杆所要求施加的预应力更大。2) 码头施工期第 1 阶段的锚碇点位移占比 11%~23%; 码头施工期第 2 阶段的锚碇点位移占比 12%~20%; 码头施工期第 3 阶段的锚碇点位移占比 48%~63%; 码头施工期第 4 阶段的锚碇点位移占比 7%~16%。因此码头前沿浚深-16~-15 m 阶段, 需要严格控制浚深速率, 防止结构产生过大变形。3) 码头前沿浚深至-10 m, 锚碇点位移占比 11%~31%; 码头前沿浚深至-15 m, 锚碇点位移占比 25%~42%; 码头前沿浚深至-16 m(设计值), 锚碇点位移 85%~91%。因此码头前沿浚深对锚碇点位移影响非常敏感, 尤其是浚深到设计值附近, 严禁超深疏浚, 并需要考虑超深疏浚对结构变形和弯矩的影响, 同时制定防控措施。4) 2# 锚碇墙底高程-15.0 m, 4# 锚碇墙底高程-18.0 m, 两者

墙体入土深度相差 3 m。但相对于 4# 锚碇墙, 浚深阶段 2# 锚碇墙锚碇点位移增大 41%, 施工期 2# 锚碇墙锚碇点位移增大 32%, 表明在设计锚碇墙时应及时将入土深度考虑在内, 这样可大幅减少锚碇墙锚碇点的位移值。

### 3.2 运行期

2008 年 1 月—2020 年 11 月为运行期间观测,

观测时间约 13 a, 需要指出的是在码头结构的运行期间, 其荷载水平满足设计的标准和要求。但在 2014 年对 2#~4# 断面进行码头前沿浚深, 最深浚深高程-17.5 m, 最大超深 1.5 m。

#### 3.2.1 结构侧向变形

运行期各年度的最大水平位移及相对施工期的位移增幅见表 5 和 6。

表 5 运行期各年度最大水平位移  
Tab. 5 Annual maximum horizontal displacement during operation period

结构名称	断面	年度最大水平位移/mm									
		2008	2011	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
前地下连续墙	2#	65	80	82	83	84	83	84	84	84	84
	4#	49	56	58	60	67	68	68	68	67	67
遮帘桩	2#	65	80	82	83	84	85	85	86	86	86
	3#	53	60	62	63	66	67	67	68	68	69

表 6 运行期各年度相对施工期最大水平位移增幅  
Tab. 6 Annual increase rate of maximum horizontal displacement during operation relative to construction period

结构名称	断面	年度最大水平位移增幅/%									
		2011	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	
前地下连续墙	2#	23	26	28	29	28	29	29	29	29	
	4#	14	18	22	37	39	39	39	37	37	
遮帘桩	2#	23	26	28	29	31	31	32	32	32	
	3#	13	17	19	25	26	26	28	28	30	

由表 5、6 可以看出: 1) 运行期前墙和遮帘桩的各断面最大位移值非常接近。2) 2014 年以后 2# 前墙和 2# 遮帘桩结构水平位移趋于稳定, 其后的 6 a, 结构水平位移几乎没有变化。运行期间的码头结构比施工期间稳定时的最大水平位移增加 28%, 稳定时间约 7 a。3) 2014 年以后 4# 前墙结构水平位移快速增大, 到 2016 年趋于稳定, 其后 4 a 结构水平位移几乎没有变化。相对于施工期, 运行期码头结构第 1 次稳定时(2014 年)最大水平位移增加 22%, 稳定时间约为 7 a; 第 2 次稳定时(2016 年)最大水平位移增加 39%。4) 2014 年以后 3# 遮帘桩结构水平位移快速增大, 到 2016 年趋于稳定, 其后 4 a 结构水平位移几乎没有变化。相对于施工期, 运行期码头结构第 1 次稳定时(2014 年)最大水平位移增加 19%, 稳定时间约为 7 a; 第 2 次

稳定时(2016 年)最大水平位移增加 30%。5) 2014 年结构各部位侧向变形都趋于稳定, 码头结构达到运行稳定状态。其后码头前沿疏浚, 由于各部位开挖超深不同, 导致结构各部位变形出现显著变化。其中 2# 断面超深很小, 3#~4# 断面超深越来越大。6) 鉴于施工期码头前沿浚深结构水平位移观测结果, 码头前沿浚深对结构水平位移影响非常敏感, 码头运行期严禁超深疏浚。

#### 3.2.2 结构锚碇点位移

由于观测时间较长, 部分仪器损坏, 这里也仅对运行期的 2# 和 4# 前墙锚碇点、2# 和 3# 遮帘桩锚碇点位移进行研究和分析。2#~4# 断面锚碇点在运行期间的位移变化特征见图 7、8, 运行期间锚碇点位移统计值及相对施工期间的位移增幅见表 7、8。

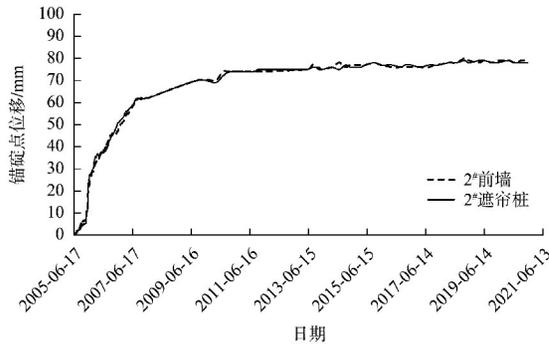


图 7 2#断面锚碇点运行期位移变化特征

Fig. 7 Displacement variation characteristics of anchor points at 2# section during operation period

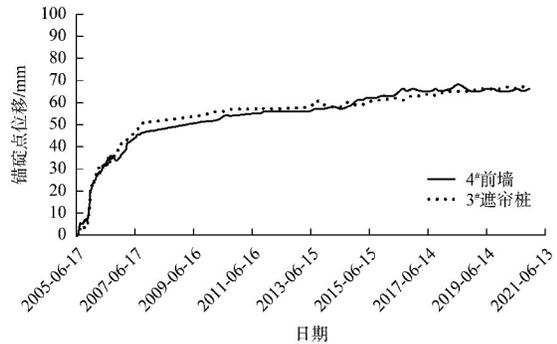


图 8 4#前墙和 3#遮帘桩锚碇点运行期位移变化特征

Fig. 8 Displacement variation characteristics of anchor points at 4# front wall and 3# curtain piles during operation period

表 7 运行期各年度锚碇点最大位移

Tab. 7 Annual maximum displacement of anchor points during operation period

结构名称	断面	年度锚碇点最大位移/mm									
		2008	2011	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
前地下连续墙	2#	62	74	75	77	77	77	78	79	79	79
	4#	47	56	57	59	63	66	66	65	65	66
遮帘桩	2#	62	75	75	76	77	77	77	78	78	78
	3#	51	57	59	59	61	63	64	65	66	66

表 8 运行期相对施工期各年度锚碇点最大位移的增幅

Tab. 8 Annual increase rate of anchor points maximum displacement during operation relative to construction period

结构名称	断面	锚碇点最大位移的增幅/%									
		2011	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	
前地下连续墙	2#	19	21	24	24	23	24	27	27	27	
	4#	19	21	26	34	40	40	38	38	40	
遮帘桩	2#	21	21	23	24	24	24	26	26	27	
	3#	12	16	16	20	24	25	27	29	29	

由表 7、8 和图 7、8 可看出：1) 码头运行期 2#断面前墙、遮帘桩锚碇点位移值非常接近，变化趋势一致。3#和 4#断面缺少相应桩墙数据，无法比较。2) 2014 年以后 2#前墙和遮帘桩结构水平位移趋于稳定，其后 6 a 结构水平位移几乎没有变化。相对于施工期，运行期码头结构稳定时最大水平位移增加 26%，稳定时间大约长达 7 a。3) 2014 年以后 4#前墙结构水平位移快速增大，到 2016 年趋于稳定，其后 4 a 结构水平位移几乎没有变化。相对于施工期，运行期码头结构第 1 次稳定时(2014 年)最大水平位移增加 26%，稳定时间约为 7 a；

第 2 次稳定时(2016 年)最大水平位移增加 40%。4) 2014 年后 3#遮帘桩结构水平位移快速增大，到 2018 年趋于稳定，其后 2 a 结构水平位移几乎没有变化。相对于施工期，运行期码头结构第 1 次稳定时(2014 年)最大水平位移增加 16%，稳定时间约为 7 a；第 2 次稳定时(2018 年)最大水平位移增加 29%。5) 2014 年结构各部位侧向变形都趋于稳定，码头结构达到运行稳定状态。其后码头前沿疏浚，由于各部位开挖超深不同，导致结构各部位变形出现显著变化。其中 2#断面超深很小，3#~4#断面超深越来越大。6) 鉴于施工期码头前沿

浚深结构水平位移观测结果, 码头前沿浚深对结构水平位移影响非常敏感, 码头运行期严禁超深疏浚。

#### 4 结论

1) 码头施工期第 3 阶段(浚深-16 m), 结构水平位移最大, 占比 41%~63%, 结构累计水平位移占比 80%~93%。码头前沿浚深对结构水平位移影响非常敏感, 尤其是浚深到设计值附近。

2) 码头施工期第 3 阶段(浚深-16 m), 锚碇点位移占比 48%~63%, 锚碇点累计位移占比 85%~91%。码头前沿浚深对锚碇点位移影响非常敏感, 尤其是浚深到设计值附近。

3) 本工程遮帘式地下连续墙板桩码头结构变形稳定时间约为 7 a。

4) 2014 年结构各部位侧向变形都趋于稳定, 码头结构达到运行稳定状态。其后码头前沿疏浚, 由于各部位开挖超深不同, 导致结构各部位变形出现显著变化, 故码头运行期严禁超深疏浚。

#### 参考文献:

- [1] XU K, ZHANG S. Applications of PLAXIS 2D in the calculation of sheet pile wharf structure [J]. *Advanced materials research*, 2013, 838/841: 2223-2226.
- [2] WU F, JIANG C H, ZHANG S, et al. Applied research of the transfer matrix method in the calculation of sheet pile wharf structure [J]. *Advanced materials research*, 2014, 838/841: 472-476.
- [3] QU H L, LUO H, HU H G. Dynamic response of anchored sheet pile wall under ground motion: analytical model with experimental validation [J]. *Soil dynamics and earthquake engineering*, 2018, 115: 896-906.
- [4] 甘乐, 张星, 吴国有. 地下连续墙板桩码头帽梁施工技术总结[J]. *科技创新与应用*, 2020(8): 140-141.
- GAN L, ZHANG X, WU G Y. Summary of construction technology for underground continuous wall steel pile

pier cap beam[J]. *Technology innovation and application*, 2020(8): 140-141.

- [5] 钟增泽. 深水地下连续墙板桩码头的施工技术[J]. *珠江水运*, 2024(23): 145-147.
- ZHONG Z Z. Construction technology of deep water underground diaphragm wall sheet pile wharf [J]. *Pearl River water transport*, 2024(23): 145-147.
- [6] 焦志斌, 蔡正银, 王剑平, 等. 遮帘式板桩码头原型观测技术研究[J]. *港工技术*, 2005(S1): 56-59.
- JIAO Z B, CAI Z Y, WANG J P, et al. Study on prototype observation technique of semi-covered type of sheet pile [J]. *Port engineering technology*, 2005 (S1): 56-59.
- [7] 郭继业, 周宝江, 范建兵. 遮帘式板桩码头结构原位测试研究[J]. *港工技术*, 2012, 49(1): 47-50.
- GUO J Y, ZHOU B J, FAN J B. In-situ measuring research on covered type sheet pile wharf structure [J]. *Port engineering technology*, 2012, 49 (1): 47-50.
- [8] 李利军, 杨海霞, 范明桥, 等. 分离卸荷式板桩码头中地下连续墙的性状[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2012, 40(4): 475-478.
- LI L J, YANG H X, FAN M Q, et al. Behaviors of underground diaphragm wall of sheet pile wharf with separated relieving platform [J]. *Journal of Hohai University (natural sciences)*, 2012, 40 (4): 475-478.
- [9] 吕林皓, 杨凯. 港口码头长期性能观测和数据采集技术初探[J]. *城市建筑*, 2014(2): 337-338.
- LYU L H, YANG K. Explore the long-term performance monitoring and data acquisition technology at the port and wharf [J]. *Urbanism and architecture*, 2014 (2): 337-338.
- [10] 吴锋, 卓杨, 刘旭. 整体卸荷式板桩码头原型观测技术[J]. *水运工程*, 2023(1): 29-33.
- WU F, ZHUO Y, LIU X. Prototype observation technology of sheet-pile wharf with rigid load-relieving component[J]. *Port & waterway engineering*, 2023(1): 29-33.