

DOI: 10.3876/j.issn.1000-1980.2012.04.020

分离卸荷式板桩码头中地下连续墙的性状

李利军^{1,2}, 杨海霞¹, 范明桥³, 黄康理³, 虞 辉²

(1. 河海大学工程力学研究所, 江苏 南京 210098; 2. 江苏省交通科学研究院股份有限公司, 江苏 南京 210017;
3. 南京水利科学研究院岩土工程研究所, 江苏 南京 210024)

摘要:针对分离卸荷式板桩码头中地下连续墙内力和变形情况复杂且无完善的计算理论的现状, 利用原型观测技术获取某港区 10 万 t 级分离卸荷式板桩码头在港池浚深期及码头运营 1 a 期内的监测数据, 探究新型板桩码头结构中地下连续墙在各种工况下的工作性状。基于原型观测数据, 推算分析地下连续墙和遮帘桩的水平位移, 拉杆拉力, 地下连续墙海、陆侧土压力及地下连续墙海、陆侧竖向钢筋应力, 混凝土应变和弯矩。结果表明: 分离卸荷式承台和遮帘桩能够起到卸荷作用, 减小地基土层对地下连续墙的侧向压力, 地下连续墙内力和水平位移较小, 码头实际运行状态良好; 码头进入满载期的地下连续墙弯矩绝对值最大, 最大正负弯矩分别为 $891 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 和 $-693 \text{ kN}\cdot\text{m}$ (弯矩以墙体海侧受拉为正)。

关键词:板桩码头; 分离卸荷式承台; 地下连续墙; 原型观测

中图分类号: U655.54+4.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2012)04-0475-04

Behaviors of underground diaphragm wall of sheet pile wharf with separated relieving platform

LI Lijun^{1,2}, YANG Haixia¹, FAN Mingqiao³, HUANG Kangli³, YU Hui²

(1. Engineering Mechanics Research Institute, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Jiangsu Transportation Research Institute Co., Ltd., Nanjing 210017, China;

3. Geotechnical Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China)

Abstract: Because of the complexity of the internal force and deformation of the underground diaphragm wall of the sheet pile wharf with a separated relieving platform, there are no perfect computational theories. To solve this problem, prototype observation was conducted to obtain data on the 100 000-ton class diaphragm sheet pile wharf in the stage of basin deepening during one year's of operation, and the properties of the underground diaphragm wall of the new sheet pile wharf in a variety of conditions were analyzed. Based on the prototype observation data, the horizontal displacement of the underground diaphragm wall and the pile, the tensile force of the pull rod, the lateral earth pressure of the underground diaphragm wall, reinforced stress, concrete strain, and the bending moment of the underground diaphragm wall were calculated. The results show that the separated relieving platform and the barrier piles could reduce the lateral earth pressure on the underground diaphragm wall, and the internal force and horizontal displacement of the underground diaphragm wall decreased, proving that the actual operation of the wharf was in good condition. During operation of the dock, the largest positive and negative bending moments were $891 \text{ kN}\cdot\text{m}$ and $-693 \text{ kN}\cdot\text{m}$, respectively (when the sea side of the wall was pulled, the bending moment was positive).

Key words: sheet pile wharf; separated relieving platform; underground diaphragm wall; prototype observation

为适应全球船舶大型化、专业化的发展趋势, 我国码头建设正向大型化和深水化泊位迈进。板桩码头具有施工周期短、工程造价低、结构耐久性好等优点, 然而其结构的强度和稳定性对水深变化反应很敏感^[1-2]。

地下连续墙具有良好的抵抗侧向压力的能力和防渗性能,尤其适用于软土地基,是新型分离卸荷式地下连续墙板桩码头的重要构件。地下连续墙属于柔性挡土结构,影响其墙体与土体相互作用的因素很多,其受力和变形情况非常复杂,相应的计算理论尚不够成熟^[3]。目前新型分离卸荷式地下连续墙板桩码头的设计参数主要依据土工离心模型试验,然而土工离心模型试验存在一定的尺寸效应和边界效应,因此利用原型观测技术研究分离卸荷式板桩码头中地下连续墙的实际工作性状十分必要。本研究根据某10万t级分离卸荷式板桩码头在港池浚深期及码头运营1a内地下连续墙内力和变形的实测数据,探究分离卸荷式板桩码头中地下连续墙在各种工况下的工作性状,评价分离卸荷式板桩码头的实际运行状态。

1 工程概况

某港区10万t级新型分离卸荷式板桩码头的设计近期为杂货泊位,远期为集装箱泊位。码头场地地层自上而下为素填土、吹填土、粉细砂、粉土、淤泥质黏土、粉质黏土及细砂层。其地下水位主要受大海潮汐的影响,极端低水位为 -1.53 m ,设计高水位为 2.02 m 。地下连续墙是码头的挡土和挡水结构,采用C30混凝土,墙厚 1.05 m ,墙底标高 -28.5 m ,墙顶标高 -0.7 m ,墙上浇筑胸墙。胸墙和锚碇墙之间采用 $Q345\varnothing90$ 的拉杆连接,拉杆间距平均值为 1.375 m 。

2 地下连续墙的工作性状

地下连续墙内力的计算准确与否关系到整个板桩码头结构的稳定性。本研究对码头施工期和使用期进行原型观测,进而分析地下连续墙的内力及变形。观测内容包括地下连续墙和遮帘桩的水平位移、拉杆拉力、地下连续墙海侧和陆侧土压力分布,墙体海侧和陆侧的竖向钢筋应力和混凝土应变^[4-7]。

地下连续墙入土段既不是自由支承,也不是完全的固定端。开挖泥面处是地下连续墙的受力变形分界面,上部墙段近似为底端固定的悬臂梁,其上作用力有土压力、剩余水压力、波浪力和拉杆拉力;下部墙段近似为竖向弹性地基梁,其上作用力有土压力、剩余水压力^[8-10]。

2.1 地下连续墙、遮帘桩的水平位移

观测期末,前地下连续墙墙身的水平位移观测值见图1,前遮帘桩桩身的水平位移观测值见图2,水平位移观测值以向陆侧为正、向海侧为负。港池浚深前期,地下连续墙处于稳定受力状态,墙身各处水平位移均较小。港池浚深结束后,由于土的流变特性,深层水平位移有一定发展。因地下连续墙地表以下 4 m 的胸墙受后期施工因素影响明显, $0\sim4\text{ m}$ 深度范围的观测值有时变化较大,但规律性不强。原型观测结果表明,1号前地下连续墙挠度较小,符合理论及客观事实;2号前地下连续墙挠度较大,可能是观测误差。地下连续墙底部位移很小,可以近似为嵌固段。墙体最大水平位移小于 21 mm ,说明地下连续墙实际运行安全稳定;墙体锚碇点处位移不大,说明拉杆充分发挥了抵抗地下连续墙向海侧位移的作用。



图1 地下连续墙水平位移

Fig. 1 Horizontal displacement of underground diaphragm wall



图2 遮帘桩水平位移

Fig. 2 Horizontal displacement of barrier pile

遮帘桩限制了土体的侧移。受各土层土体发生侧移作用影响,遮帘桩的陆侧与海侧位移不连续,桩体海侧上部受拉,陆侧下部受拉。遮帘桩减小了土体对前地下连续墙的侧向作用。遮帘桩主要承受竖向荷载作用。码头上部结构以及堆载产生的作用通过分离式卸荷承台传递给遮帘桩,再通过遮帘桩传递至地基土层深处,从而减小了这部分荷载在地基土层中产生的侧向压力,起到了卸荷作用。

2.2 拉杆拉力

拉杆拉力观测值随时间变化的曲线见图 3。由图 3 可见,拉杆拉力在港池浚深初期有较大幅度的增加,2 号拉杆拉力的变化比 1 号拉杆大。码头前沿挖泥阶段,1 号拉杆拉力为 50~140 kN,2 号拉杆拉力为 100~200 kN。码头加载后进入运营阶段,拉杆拉力缓慢增大并逐渐趋于稳定,1 号拉杆拉力为 130~150 kN,2 号拉杆拉力为 190~230 kN。

选取码头使用期的一组典型数据,根据拉杆锚碇处前墙与锚碇墙的水平位移差值求得拉杆的伸长约为 5 mm,则拉杆应变为 $\epsilon_s = 5/40\,000 = 1.25 \times 10^{-4}$,由拉杆应变可得拉力 F :

$$F = E_s \epsilon_s A_s = 2.1 \times 10^5 \times 1.25 \times 10^{-4} \times \frac{3.14 \times 90^2}{4} = 167\text{ kN}$$

(1)

式中 : E_s ——拉杆的弹性模量,MPa ; A_s ——拉杆截面积,mm²。

计算结果表明,对拉杆拉力的观测结果是正确的,本工程的原型观测成果是可靠的 ,拉杆应力远小于拉杆极限抗拉强度,说明本工程结构运行安全。

2.3 地下连续墙侧向土压力分布

土压力随时间变化不断波动。码头进入运营期,选取典型的土压力观测值,推算前墙海、陆侧土压力变化曲线,见图 4。对地下连续墙侧向土压力的观测结果表明 :(a)港池浚深前,墙侧土压力近似服从静止土压力分布规律,各土层分布的不均匀性造成土压力分布出现波动,但总体土压力分布规律不变。(b)港池浚深后,主动区土压力有所减小,被动区土压力略有增大,符合港池浚深阶段柔性挡土墙的土压力分布规律。由于本工程地基存在分层土,所以表现出多拱现象。

土压力变化规律为 :(a)港池浚深初期,挖泥范围较小时,码头整体范围内地下连续墙海侧和陆侧的土压力变化不一致,故墙体与土体的变形应考虑空间作用,地下连续墙的海侧局部挖泥卸载后,由于周围还未开挖,地下连续墙没有发生位移。(b)港池浚深后期及开挖结束后,码头整体范围内地下连续墙海侧和陆侧的土压力变化一致,地下连续墙近似为平面应变状态,地下连续墙发生指向海侧位移,陆侧泥面以上的土压力减小。(c)地下连续墙陆侧的土压力因地下连续墙位移增大而减小时,墙体与土体摩擦力减小,土体变形模量相对减小,应力扩散能力减弱,使得相邻的下卧层侧压力增大。港池底泥面以上两侧的土压力与剩余水压力叠加值指向海侧,泥面附近二者叠加值指向陆侧,接近墙底部分二者叠加值指向海侧。

2.4 地下连续墙钢筋应力、混凝土应变及弯矩分布

通过观测地下连续墙钢筋应力和混凝土应变,可分析地下连续墙的实际工作状态,并参照相关经验公式推算其结构弯矩。观测期内前地下连续墙的最大竖向钢筋应力及混凝土应变观测结果见表 1。钢筋应力与混凝土

应变的变化规律为 :(a)港池浚深前,地下连续墙各深度的钢筋应力均接近零,地下连续墙自重产生的压力主要由混凝土承担。(b)港池浚深过程中,泥面以上陆侧钢筋应力与混凝土应变均向负值快速增大,泥面以上海侧钢筋应力与混凝土应变均向正值快速增大,泥面以下陆侧钢筋应力与混凝土应变均向正值缓慢增大,泥

图 3 拉杆拉力随时间的变化

Fig. 3 Change of tensile force of pull rod with time

图 4 前墙侧向土压力的变化

Fig. 4 Change of lateral earth pressure of wall

表 1 地下连续墙钢筋应力与混凝土应变

Table 1 Reinforced stress and concrete strain of underground diaphragm wall

断面	钢筋应力最大值/MPa		混凝土应变最大值	
	拉应力	压应力	拉应变	压应变
1 号	36.18	- 16.30	161.48×10^{-6}	$- 87.68 \times 10^{-6}$
2 号	36.67	- 23.12	166.91×10^{-6}	$- 146.44 \times 10^{-6}$

面以下海侧钢筋应力与混凝土应变均向负值缓慢增大。(c)港池浚深结束后,钢筋应力和混凝土应变虽然增大,但增速有所降低。(d)进入加载期后,钢筋应力和混凝土应变逐步达到极值,随着码头进入正式运营阶段,由于土的流变特性,钢筋应力和混凝土应变均逐渐减小,并缓慢趋于稳定。

钢筋应力和混凝土应变变化规律一致,说明钢筋与混凝土能够协调变形,钢筋应力和混凝土应变都很小,说明结构材料处于弹性变形状态。这就验证了本工程结构设计的安全性。地下连续墙的竖向钢筋最大拉应力的观测值为 36.67 MPa,小于钢筋抗拉强度设计值,混凝土的最大拉应变的观测值为 166.91×10^{-6} ,小于混凝土极限拉应变。上面的分析说明本工程地下连续墙运行安全,但尚有优化结构设计空间。

参照相关规范和文献^[11-13],推算施工期及运营期地下连续墙的弯矩,表明:(a)在弯矩作用下,开挖泥面以上地下连续墙海侧受拉,开挖泥面以下地下连续墙陆侧受拉。(b)随着港池浚深过程的发展,港池深度不断增大,地下连续墙的弯矩不断增大,码头进入满载期时地下连续墙的弯矩绝对值最大,最大正弯矩为 891 kN·m,出现在标高为 -5 ~ -11 m 区域,最大负弯矩为 -693 kN·m,出现在标高为 -16 ~ -20 m 的区域(弯矩以墙体海侧受拉为正)。

3 结 语

分离卸荷式板桩码头中地下连续墙的内力和变形与土压力、剩余水头和拉杆拉力等相互关联。对原型观测数据推算分析的结果表明,地下连续墙在各种工况下的内力与水平位移较小,码头实际运行状态良好,结构安全可靠。弯矩是分离卸荷式板桩码头结构设计的主要参数,地下连续墙的实际弯矩为分离卸荷式地下连续墙板桩码头结构优化设计提供了重要的依据。

参考文献:

- [1] 刘永绣,吴荔丹,李元音.一种新型码头结构型式:半遮帘式深水板桩码头结构的推出[J].港工技术,2002(3):15-18. (LIU Yongxiu, WU Lidan, LI Yuanyin. A new type of wharf structure the structure of semi-covered type of deep water sheet pile wharf[J]. Port Engineering Technology, 2002(3):15-18. (in Chinese))
- [2] 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(增刊1):12-15. (LIU Yongxiu. Design conception and practice of building sheet pile wharfs in deep waters: development of a new structure of covered type of sheet pile wharf[J]. Port Engineering Technology, 2005(Sup1):12-15. (in Chinese))
- [3] 焦志斌,刘永绣.地下连续墙测试中弯矩的计算方法探讨[J].岩土工程学报,2006,28(增刊1):1485-1488. (JIAO Zhibin, LIU Yongxiu. Calculation methods of bending moment in diaphragm wall tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(Sup1):1485-1488. (in Chinese))
- [4] JTS 218—2005 水运工程水工建筑物原型观测技术规范[S].
- [5] 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(增刊1):56-59. (JIAO Zhibin, CAI Zhengyin, WANG Jianping, et al. Study on prototype observation technique of semi-covered type of sheet pile[J]. Port Engineering Technology, 2005(Sup1):56-59. (in Chinese))
- [6] 南京水利科学研究院土工研究所.土工试验技术手册[M].北京:人民交通出版社,2003:375-422.
- [7] 秦网根,范明桥,黄康理,等.分离卸荷式板桩码头原型观测技术研究[J].港工技术,2010,47(3):32-34. (QIN Wanggen, FAN Mingqiao, HUANG Kangli, et al. Study on prototype observation technique of sheet-pile wharf with separated relieving platform[J]. Port Engineering Technology, 2010, 47(3):32-34. (in Chinese))
- [8] 陈万佳.港口水工建筑物[M].北京:人民交通出版社,1989:127-185.
- [9] JTJ 215—98 港口工程荷载规范[S].
- [10] JTS 167—3—2009 板桩码头设计与施工规范[S].
- [11] 焦志斌.卸荷式地下连续墙板桩码头结构与土相互作用研究[D].南京:河海大学,2008.
- [12] JTJ 267—98 港口工程混凝土结构设计规范[S].
- [13] GB 50010—2010 混凝土结构设计规范[S].