整体卸荷式板桩码头结构离心模型试验研究

司玉军1, 曾友金2,3, 解占强1, 武文奎1, 李东青1

(1. 唐山曹妃甸港口有限公司,河北 唐山 063200; 2. 南京水利科学研究院,江苏 南京 210029; 3. 水利 部水科学和水工程重点实验室,江苏 南京 210029)

摘要:为了研究前板桩墙与卸荷平台群桩基础连接为整体的整体卸荷式板桩码头结构受力变形特性与工程特性,进行了较为系统的大型土工离心模型试验.研究了前板桩墙弯矩分布、卸荷平台下各排桩桩身弯矩与轴力分布、拉杆力及锚着点水平变形,推荐了各结构构件受力的设计控制值,分析了整体卸荷式板桩码头结构的工作特性.

关 键 词:板桩码头;离心模型;群桩基础;卸荷 中图分类号:TU411 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-640X(2009)03-0086-07

某港区拟建造一个近期为10万t杂货泊位,远期为集装箱泊位.泊位所在地基地层自上而下主要为粉细砂层、淤泥质粉质黏土层、粉质黏土层、粉土、黏土.设计中提出采用前板桩整体卸荷式码头结构,有2个设计方案,分别是以锚碇墙和拉杆来承受码头结构水平力的锚碇墙拉杆设计方案和以海侧与陆侧斜桩来共同承受码头水平力的叉桩方案.前板桩整体卸荷式板桩码头结构的特点是浇注的胸墙将前板墙与卸荷平台连接为整体.2个方案的共同点是卸荷平台下均设4排桩;采用水下混凝土浇注的地下连续墙作为前板墙,墙厚1m,墙底标高为-30.0m;岸壁前沿设计岸壁底标高为-15.5m,顶面标高为4.8m.对于锚碇墙拉杆方案,卸荷平台下设4排灌注桩,灌注桩排架间距为4.0m,桩身直径为1000mm,桩底端标高为-50m;平台后设 Ф75 mm 钢拉杆,拉杆间距1.33m,以手旋紧张器拉紧;距码头前沿44.5m处设置锚碇地连墙,锚碇地连墙厚度为0.8m,墙底标高-10.0m,锚碇墙上现浇钢筋混凝土导梁.

整体卸荷式板桩码头结构因将前板墙与卸荷平台连接为整体,相比于分离卸荷式板桩码头结构^[1-3]有 许多技术难题,如整体式的前板墙与承台群桩基础刚度如何分配,超长桩群桩基础在码头面堆载与后场土体 侧向变形下桩身轴力分布、桩身弯矩分布、桩身侧向土压力分布、群桩基础遮帘效应、桩顶是否存在很大轴向 拉力、前板墙墙身弯矩分布与土压力分布、前板墙与承台群桩基础的相互作用机理等.由于这种整体卸荷式 码头结构属国内外首次提出,无相应的设计规范可循,为此进行了系统的大型土工离心模型试验.因篇幅所 限,本文主要介绍锚碇墙拉杆方案的试验成果,叉桩方案见另文介绍.

1 离心模型试验模拟技术

1.1 模型设计与制作

锚碇墙方案结构断面见图 1. 土工离心模型试验在南京水利科学研究院 NHRI 400 g·t 土工离心机^[4]上进行. 综合考虑码头结构断面几何尺寸、平面应变模型箱(1000 mm(长)×400 mm(宽)×1000 mm(高))、模

收稿日期:2008-11-03

作者简介:司玉军(1981-),男,河北承德人,工程师,学士,主要从事港口工程与建设管理工作. E-mail: siyujun2007@163.com

型制作及测量等因素,选定模型比尺为82.

由于前板桩墙、锚碇墙和卸荷平台在码头结构中属于抗弯构件,按等抗弯刚度相似进行设计计算^[5-11]. 已知铝合金板 E_m = 70 GPa,钢筋混凝土 E_p = 28 GPa, N = 82, 计算出模型前板桩墙厚度 d_m = 9.0 mm, 长度 h_m = 424 mm,锚碇墙的尺寸为 156 mm×400 mm×8 mm,卸荷平台的尺寸为 199 mm×400 mm×11 mm.



表1 地基土层物理力学性质

No.	土层	层顶标高	层底标高	$\gamma \neq (kN \cdot m^{-3})$	C_q / kPa	$arphi_q/~^\circ$
1-1	回填砂	4.8	0	18	0	28
1-2	粉质黏土	0	-3.63	19.2	18.3	11.6
1-3	粉细砂	-3.63	-14.63	19.7	/	/
2-1	粉质黏土	-14.63	-21.23	19.3	24.6	10.2
2-3	粉质黏土	-21.23	-26.63	19.46	20.5	8.7
3-1	粘土	-26.63	-29.53	18.81	28.2	9.5
3-1	粉质黏土	-29.53	-35.23	20.08	26	11
4-0	粉质黏土	-35.23	-38.53	19.95	6.9	17.6
4-1	粉 土	-38.53	-41.93	20.04	8.3	26.3
5-0	粉质黏土	-41.93	-50.53	19.3	28.1	12.4
6-2	粉质黏土	-50.53	57.73	21.03	29.5	15.6

Tab. 1 Physical and mechanical properties of soil

码头结构中的拉杆为受拉构件,按等抗压刚度相似进行设计.原型拉杆直径为75 mm,模型拉杆用同样的钢材料制作,同时用1根模型拉杆模拟3根原型拉杆进行布置,这样设计出的模型拉杆直径为1.58 mm, 净长324 mm,间距48 mm.为了测量拉杆力,根据以往测试经验,须将圆截面拉杆改为等面积的矩形截面拉条,这样设计采用的拉杆截面尺寸为3.3 mm×0.6 mm.桩也按桩身轴向抗压刚度相似来设计计算,其尺寸为615 mm×8 mm×8 mm.

原型地基各土层的主要物理和强度指标见表1.制备土样取自原型现场,粉细砂按相对密度控制制备,

粉质黏土和粉土按不排水强度指标作为控制指标.根据直剪强度指标来确定 $S_u: S_u = \mu(C_q + \sigma \tan \varphi_q)$,其中 σ 为土层中点的固结压力; μ 为折减系数(0.7 ~ 0.9),考虑直剪强度试验特点及工程经验,本次试验取 0.7.

本模型试验开展了前墙与灌注桩的弯矩、灌注桩与拉杆的轴力、前墙与锚碇墙变位等测量.具体测量元件和试验程序介绍参见文献[7,8].根据试验要求,在试验中采用溢流水位法控制港池水位对应原型极端低水位(-1.27 m).

1.2 试验方案布置

在模型试验过程中,注意到整体式码头结构内力对结构位移较为敏感;在模型制作过程中,还注意到前 墙与较长桩体同时压入模型地基所导致的挤土现象会影响内力测试结果.为此,针对该方案进行多组重复模型,各组模型测试布置情况见表 2.

表2 离心模型试验布置

Tab. 2 Test arrangements of centrifuge model					
模型编号	地基类型	测 试 桩 布 置			
笛1细(M1)	设计概面地其	第1排桩中测1根桩的弯矩和轴力、第2和第4排桩中各测1根桩			
为151(111)	以自動面地墨	的轴力			
第 2 组 (₩2)	况让此无由甘	第1 排桩中测1 根桩的弯矩和轴力、第2 排桩中测2 根桩的轴力、第			
第2组(M2)	议计例面地举	4 排桩中测 1 根桩的弯矩			
第3组(M3)	设计断面地基	每排桩测1根桩的弯矩			
第4组(M4)	设计断面地基	每排桩测1根桩的轴力			
第5组(M5)	设计断面地基	每排桩测1根桩的弯矩			
第6组(M6)	设计断面地基	每排桩测1根桩的弯矩			

注:靠海侧的为第1排桩,靠陆侧的为第4排桩.



2 模型试验结果分析

本模型试验关于码头运营中前墙和卸荷平台群桩各排桩的弯矩,均以朝海侧受拉为正;桩身轴力以压为 正;拉杆拉力以受拉为正;前墙位移、卸荷平台位移及锚碇墙位移均以朝海侧为正.

2.1 前墙弯矩

前墙单宽弯矩分布见图 3. 可见,墙上端海侧受拉,弯矩为正,墙下端陆侧受拉,弯矩为负,前墙弯矩反弯 点在标高-20~-23 m之间,即在前沿泥面线以下 3.5~6.5 m范围内.从前墙最大正、负弯矩可知,6 组重复 模型中实测的最大正弯矩为 2 108 kN·m/m,最小为 1 526 kN·m/m,对应位置标高约在-10 m;实测的最大

负弯矩-560 kN ·m/m,最小为-155 kN ·m/m,对应位置标高约 在-25 m. 分析制备的模型地基强度可见, 当制备的地基强度偏 低时,前墙的最大正弯矩较大:反之,前墙的最大正弯矩较小. 根据6组重复模型前墙弯矩分布和模型制备的地基强度情况. 初步确定该方案前墙最大正弯矩的控制值为1700~1800 kN ·m/m,并推荐了前墙弯矩分布图(见图3).

2.2 卸荷平台群桩基础桩身弯矩

灌注桩桩身弯矩分布见图 4. 其总体特征是, 桩顶附近桩 身弯矩为正,桩端附近桩身弯矩为负,除第1排桩外,桩顶位置 处的桩身弯矩最大;各排桩桩身弯矩零点只有1个,即反弯点, Fig.3 Distributions of bending moment of the front wall 且位置基本相同,均在标高-22 m~-28 m;第1,2,3 排桩的桩





身最大负弯矩所在位置,均在标高-30 m 附近,而第4 排桩的桩身最大负弯矩在标高-36 m 附近.从各排桩 桩身最大正负弯矩可知,几组重复模型中实测的最大正弯矩,对于第1排桩,最大值为1656 kN·m,最小值 为1 162 kN ·m,对应位置标高在-15.8 m;第2 排桩,最大值为1 963 kN ·m,最小值为1 448 kN ·m;第3 排 桩,最大值为1922 kN·m,最小值为1456 kN·m;第4 排桩,最大值为2309 kN·m,最小值为1868 kN·m 根据几组重复模型桩身弯矩分布,初步确定该方案设计断面地基上各排桩最大正弯矩的控制值为1700~2 200 kN·m,并推荐了各排桩桩身弯矩分布(见图4).



2.3 卸荷平台群桩基础桩身轴力分布

卸荷平台下4排灌注桩基础,承受的竖向荷载为卸荷平台上的填土自重(平台顶面至码头面4.8 m标 高)、码头面载 30 kPa 及胸墙自重.因前板桩墙与卸荷平台连接成整体,这些竖向荷载由4 排灌注桩和前墙 (看作紧密排列的排桩)共同承担.同时,港池开挖和后场堆载引起土体侧向变形,影响4排灌注桩桩间土竖 向沉降分布,从而影响各排桩桩土相对位移沿桩身分布,即桩侧摩阻力沿桩身的发挥.另外,卸荷平台上竖向 荷载分布不均匀(胸墙自重较大)、前墙与灌注排桩的轴向抗 压刚度差别及群桩效应.因此,4排灌注桩在竖向荷载下的桩 顶轴力分布和桩身轴力沿桩身分布均不同.

各排桩桩身轴力分布图 5. 可见,港池开挖和后场堆载引 起土体侧向变形而诱发某一标高土层以上的桩间土沉降,比 桩身沉降大,桩身承受负摩阻力,桩顶附近桩轴力沿桩身逐 渐增大,其分布类似负摩擦桩分布. 在同一标高处,第1 排桩 桩轴力较大,主要受前墙和临近排桩的影响较大,以及竖向 荷载分布不均所致.

2.4 拉杆受力分析

每组模型中布置8根拉杆,其中测试拉杆一般布置4根(M3模型中布置了5根),测试拉杆与非测试拉杆间隔布置,



Fig. 5 Distributions of axial force of the piles

测点布置在测试拉杆的中间位置.各组模型试验测试拉杆随加速度发展过程曲线表明,同一组模型内各拉杆 拉力差别不大.将每组模型中所有实测的拉杆轴力平均测值作为该组模型试验拉杆的轴力值(见表 3),模型 M1,M3,M4的拉杆轴力平均值与模型 M5 和 M6 相差较大,主要原因在于测试拉杆和非测试拉杆的初始张 紧力调节不均匀.在制备模型中,拉杆安装需将 8 根测试拉杆和非测试拉杆预先调节松紧度.在模型 M1, M3,M4 的拉杆安装过程中,将测试拉杆调的较紧,而非测试拉杆调的较松,这样导致测试拉杆所测的拉力值 较大.在随后的模型 M5 和 M6 的拉杆安装过程中,仔细调整测试拉杆和非测试拉杆的松紧度,尽量做到测试 拉杆和非测试拉杆松紧度相同,这样获得测试拉杆的拉力值相对比较合理.针对设计断面地基拉杆安装与调 节过程的情况,特在 2 组纯粉细砂地基模型中,将测试拉杆调节的较紧,而非测试拉杆调节的较松,结果是实 测的拉杆拉力值普遍偏高.针对试验过程中拉杆安装与调节松紧的程度,推荐设计断面地基上的拉杆拉力分 为 700~750 kN.

		Tab	Tab. 3 Axial force of bars			(单位: kN)
模型编号	第1根	第2根	第3根	第4根	第5根	平均值
M1	1 070	1 096	1 012			1 059
M3	888	1 036	1 218	960	985	1 017
M4	1 084	1 125	744	1 124		1 019
M5	572	649	664	815		675
M6	685	663	968	518		709

表 3 拉杆拉力实测值

2.5 码头结构变位及整体稳定性状

相同结构形式的重复模型,同一测点处的位移存在一定的差异,但差值并不大(见表4).将这些测量值 取平均后更能从总体上反映测点处的位移情况,设计断面地基模型试验的前墙和锚碇墙在锚着点标高位置 处(▽0.6 m)的侧向变位分别为104 和71 mm.值得说明是,码头各构件锚着点所测的水平位移,是利用激 光位移传感器测码头结构构件同一纵断面某位置点的水平位移,再利用该构件线性变形的假定,推算锚着点 的水平位移.

		Tab. 4 Horizontal	displacement of stru		(单位:mm)	
模型编号	M1	M2	M3	M4	M5	M6
前墙	106	94	119	116	92	97
锚碇墙	74	60	86	83	61	64

表4 码头结构锚着点水平位移

关于码头整体稳定性状,它也主要体现在码头各部分的位移状况上,尤其是码头前沿前墙和胸墙的侧向 变位上.在试验过程中及在停机后,模型整体性状完好,没有观察到开裂等不稳定的迹象,因此,码头结构整 体稳定.

综上分析,因前板桩墙与卸荷平台通过胸墙相互连接而形成整体,4 排桩、卸荷平台、胸墙及前墙形成刚 构构件,其受力情况比拉杆直接连接在前板桩墙和锚碇墙间的分离卸荷式板桩码头结构受力要复杂,所实测 的各构件内力大小与分布,可能不宜与分离卸荷式板桩码头结构的内力进行简单对比^[12].

3 结 语

为了深入研究锚碇墙拉杆方案整体卸荷式板桩码头结构受力变形特性与工程特性,共进行了6组大型 土工离心模型试验,研究了前板桩墙弯矩分布、各排桩桩身弯矩与轴力分布、拉杆力及锚着点水平变形,分析 了整体卸荷式板桩码头结构的工作特性,得出了码头结构运营期前墙的最大正弯矩、灌注桩的最大正弯矩、 拉杆力及前墙锚着点的水平位移.但因前板桩墙与卸荷平台通过胸墙相互连接而形成整体,锚碇墙拉杆方案 所实测的各构件内力大小与分布,可能不宜与分离卸荷式板桩码头结构的内力进行简单对比.

参考文献:

- [1] TSINKER G P. Handbook of port and harbor engineering: geotechnical and structural aspects[M]. ITP International Thomson Publishing, 1997.
- [2] 刘永绣. 板桩和地下墙码头的设计理论和方法[M]. 北京:人民交通出版社, 2006. (LIU Yong-xiu. Design theory and method for sheet-pile and diaphragm wall[M]. Beijing: China Communications Press, 2006. (in Chinese))
- [3] 徐光明,蔡正银,刘永绣,等。卸荷式地连墙板桩码头结构的离心模型试验研究[A]//中国土木工程学会第十届土力 学及岩土工程学术会议论文集,重庆:重庆大学出版社,2007:527-531. (XU Guang-ming, CAi Zheng-yin, LIU Yongxiu, et al. Centrifuge modeling for a sheet-pile bulkhead of diaphragm with load-relief platform[A]//Proceedings of the Chinese 10th National Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Chongqin: Chongqin University Press, 2007: 527-531. (in Chinese))
- [4] DOU Y, JING P. Development of NHRI-400 g×t geotechnical centrifuge[A] // LEUNG C F, LEE F H, TAN T S. Proceedings of the International Conference on Centrifuge 94, A A Balkema Publisher, 1994: 69–74.
- [5] BOLTON M D, POWRIE W. The collapse of diaphragm walls retaining clay[J]. Geotechnique, 1987, 37(3): 335-353.
- [6] XU Guang-ming, CAI Zheng-yin, ZENG You-jin, et al. Centrifuge modeling for a new type sheet pile bulkhead with barrier piles [A] // NG C W W, ZHANG L M, WANG Y H. Proceedings of the 6th International Conference on Physical Modelling in Geotechnics-6th ICPMG'06, Taylor & Francis Group, 2006: 1125-1129.
- [7] 蔡正银,徐光明,曾友金,等. 遮帘式板桩码头土压力离心模型试验研究[J]. 港工技术, 2005, 42(增刊): 51-55.
 (CAI Zheng-yin, XU Guang-ming, ZENG You-jin, et al. Experimental study of centrifugal models to test earth pressure on covered sheet pile wharfs[J]. Port Engineering Technology, 2005, 42(Supp): 51-55. (in Chinese))
- [8] 刘永绣,吴荔丹,徐光明,等. 遮帘桩板桩码头工作机制[J]. 水利水运工程学报,2006(2):8-12. (LIU Yong-xiu, WU Li-dan, XU Guang-ming, et al. Preliminary study of working mechanism of a new type sheet pile bulkhead with barrier piles
 [J]. Hydro-Science and Engineering, 2006(2):8-12. (in Chinese))
- [9] WHITE D J. Contributions to geotechnique 1948-2008: physical modeling[J]. Geotechnique, 2008, 58(5): 413-421.
- [10] 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. (LI Jing-lin, WANG Jian-ping, CAI Zheng-yin, et al. Centrifuge model tests on sheet-piled wharf renovated by barrier pile project[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(8):978-982. (in Chinese))
- [11] 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(6):1182-1187. (LI Jing-lin, CAI Zheng-yin, XU Guang-ming, et al. Centrifuge modeling test on covered sheet piled structure of wharf

 $[\,J\,].$ Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007(6):1182-1187. (in Chinese))

[12] 徐光明,蔡正银,曾友金.京唐港 18#~19#泊位深水卸荷式地连墙板桩码头结构离心模型试验研究报告[R].南京: 南京水利科学研究院, 2006. (XU Guang-ming, CAI Zheng-yin, ZENG You-jin. Research report of centrifugal modeling for a sheet-pile bulkhead of diaphragm with load-relief platform for No 18~19 berths[R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2006. (in Chinese))

Centrifuge modeling for sheet-pile bulkheads with a rigid load-relieving component

SI Yu-jun¹, ZENG You-jin^{2,3}, XIE Zhan-qiang¹, WU Wen-kui¹, LI Dong-qing¹

Caofeidian Port Co., Ltd. of Tangshan, Tangshan 063200; 2. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 3. Key Laboratory of Water Science and Engineering, MWR, Nanjing 210029, China)

Abstract: A study by means of centrifuge model tests was conducted in order to investigate the behavior of the reinforced concrete sheet-pile bulkheads with a rigid load-relieving component. The rigid load-relieving component consists of a top reinforced concrete plate and four rows of upright piles rigidly connected with the plate. Bending moment, axial force and displacement of the structural components were measured so that the distributions of bending moment of the front wall and the four rows of piles beneath the load-relieving plate, and the distributions of axial force of the piles were obtained. An insight of the overall working behavior of this innovative sheet-pile bulkhead is gained from the analysis of the test results. And the control values for the design of each structural component are finally recommended.

Key words: sheet-pile bulkhead; centrifuge model test; pile group foundation; load-relieving

