单锚板桩结构码头离心模型试验研究

李士林,徐光明

(南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029)

摘要:近年来板桩结构码头在国内得到广泛应用,为完善板桩结构码头的设计计算理论,本文采用土工离心模型试验模拟了2种前墙形式,即钢筋混凝土地连板桩前墙和钢板桩前墙,前墙挡土高度分别达18 m 和21 m.试验量测了前墙、锚碇地连墙的弯矩,前墙海陆两侧和锚碇地连墙海侧的土压力,同时还量测了拉杆力及前墙、锚碇地连墙顶端的水平位移.试验结果表明,单锚板桩结构码头的性状与码头结构的变形密切相关,前墙挡土高度一定时,码头整体性状和各构件的内力均受前墙刚度的制约.

关 键 词:离心模型;板桩码头;地连墙;钢板桩墙;弯矩;拉杆力;位移;土压力 中图分类号:TU411 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-640X(2008)01-0067-06

Centrifuge modeling tests for sheet-pile bulkhead anchored by single layer of tie-rods

LI Shi-lin, XU Guang-ming

(Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: The sheet-pile bulkhead has been widely used in China in recent years. In order to verify and perfect the current design and computation theories, sheet-pile bulkheads anchored by a single layer of tie-rods have been studied by centrifuge modeling tests. In the tests, reinforced concrete diaphragm sheet-pile front wall and steel sheet-pile front wall are simulated respectively with the retaining heights of 18 m and 21 m. The bending moment of the front wall and the rear anchored diaphragm wall, the earth pressure of both sides of the front wall and the seaward side of the rear wall are measured, and the tensile force of tie-rods are measured as well. At the same time, the horizontal displacements of the front and the rear walls and the stability of structure during the operation process are also observed. The analysis of test results shows that the mechanical responses of the structural components of the bulkhead are not only governed by the retaining height of the front wall, but also closely related to its deformation, which is the function of its bending stiffness.

Key words: centrifuge model; sheet-pile bulkhead; diaphragm wall; sheet-pile wall; bending moment; tensile force; displacement; earth pressure

板桩结构码头(尤其是钢板桩结构码头)以其结构形式简单,造价低廉,施工周期短等独特优点,在国外

收稿日期: 2007-05-09

作者简介:李士林(1982-),男,湖南永顺人,硕士,主要从事土工试验研究. E-mail: njhrilsl@126.com

应用非常普遍^[1,2]. 然而,受设计理论和工程实践的限制,过去我国板桩码头结构仅用于中小型港口工程. 近 年来,钢筋混凝土地连墙型式的板桩码头结构有了新的发展,先后开发了遮帘式板桩结构码头和分离卸荷式 板桩结构码头等新型板桩结构型式,并在多个大型深水泊位建设中成功应用^[2].

目前,板桩结构码头的计算方法有多种^[1-6],规范^[4]建议的计算方法是基于古典理论的弹性线法、自由 支撑法和竖向弹性地基梁法,它们基于多种假定.这些假定的合理性尚无可靠资料加以验证.进行原型观测 和物理模型试验是获取可靠资料的最有效途径.为此,本文开展了大型土工离心模型试验,以验证现有板桩 结构码头的设计计算方法,从而为提出较为满意的修正方法提供依据.

1 离心模型试验概况

1.1 试验设备及方案

离心模型试验是将 1/N 缩尺的模型置于离心机中(N 为模型比尺,定义为原型与模型几何尺度之比), 让其承受 Ng 离心加速度的作用.鉴于土工离心模型和原型中的土体及其结构物在对应点的应力水平相同, 这样就能很好地反映原型的性状,达到用模型再现原型的目的^[7,8].

本次试验在南京水利科学研究院 400 g·ton 大型土工离心机上进行,该机最大旋转半径 5.5 m,最大离 心加速度 200 g,最大模型负荷 2 000 kg.数据采集系统由放大器、前级机及微机组成.试验时,布置在模型中 的传感器输出信号,经放大器放大后送到前级机,由前级机进行 A/D 转换成数字信号并传至主机,通过主机 显示、存储测量结果并进行处理^[7].

试验采用大型平面应变模型箱盛放板桩结构和地基土体模型,模型箱净空尺寸为1000 mm×400 mm×1 000 mm. 根据板桩结构码头最新规模,确定了2种原型挡土高度,即18 m和21 m,所研究的原型前墙分别是钢筋混凝土地连墙和钢板桩,地基为均质粉细砂层.考虑到测量的可操作性,选取模型比例尺 N=52.6,由此设计了4 组模型试验(见表1).

Tab. 1 Four cases simulated in the model study			
模型序号	前墙形式	前墙挡土高度/m	地基条件
M1	地连墙	18	均质粉细砂
M2	地连墙	21	均质粉细砂
М3	钢板桩	18	均质粉细砂
M4	钢板桩	21	均质粉细砂

表1 模型试验的4种工况

1 . .1

1.2 试验模型的制备及布置

1.2.1 试验原型概况 所模拟的原型码头结构和地基 示意图见图 1.图中前墙为厚 1 000 mm 的 C30 钢筋混凝 土地连墙,也或为组合钢板桩(型号: HZ975 A/AZ18),惯 性矩为 337 840 cm⁴/m,弹性模量为 2.06×10⁸ kN/m²,锚 碇结构为厚 800 mm 的 C25 钢筋混凝土锚碇地连墙,拉杆 为 Φ85 钢锚杆.按 N=52.6 设计的模型,其剖面和平面布 置见图 2.

1.2.2 试验模型制备 采用铝合金材料来模拟钢筋混凝土地连板桩墙、钢板墙和锚碇地连墙.由于前墙、锚碇 地连墙在码头结构中属于抗弯构件.因此,按等效抗弯刚 度理论进行设计计算^[8].模型构件的尺寸分别为,地连墙



板桩墙:396 mm(宽)×14 mm(厚)×552 mm(高)、钢板桩墙:396 mm(宽)×9.4 mm(厚)×552 mm(高)、锚碇 地连墙:396 mm(宽)×271.9 mm(高)×11.2 mm(厚).



拉杆为受拉构件,按应力相似进行模型设计.由条件 $\varepsilon_m = \varepsilon_p, \sigma_m = \sigma_p$ 得(EA)_m = (EA)_p/ N^2 ,计算得模型 拉杆直径为2.28 mm.为了测量方便,根据以往测试经验,将圆截面拉杆改为等面积矩形截面的拉条,修改后 模型拉杆的截面尺寸为6.8 mm×0.6 mm.

模型地基土为自然风干状态下的粉细砂,采用等落高砂雨法制备,它的相对密度0.41,内摩擦角34°.制备时控制落高为1 m,其粒径组成为 *d*>0.25 mm 的占1.9%,0.075 mm ≤ *d* ≤ 0.25 mm 的占92%,*d* < 0.075 mm的占6.1%.模型中地基土层总厚度为790 mm(相当于原型厚41.6 m 的粉细砂地基).

1.2.3 模型测量 前墙和锚碇地连墙的弯矩、拉杆内力采用应变计测量.前墙、锚碇地连墙的侧向土压力则采用新研制的 BW-3型系列界面土压力盒(盒外径 16 mm,厚4.8 mm^[9])量测.前墙、锚碇地连墙的水平变位用德国 Wenglor 公司的 YP05MGVL80 型激光传感器测量,这是一种非接触式传感器,量程为 10 mm,量测精度为 2 μm,即 0.002 mm.

2 模型试验结果及分析

2.1 前墙弯矩分布

首先需要说明的,本文所给出的试验数据,均已根据土工离心模型相似律^[7,8]将模型测试值换算至原型. 前墙是板桩结构码头的核心构件,主要承受墙后陆侧土压力、墙前海侧土压力和拉杆提供的锚固力等荷

载. 模型试验得到的前墙单宽弯矩分布见图 3. 可见,4 组 工况下的前墙弯矩沿墙深分布形态基本相似,即墙体上部 弯矩为正,靠海侧受拉,下部弯矩为负,靠陆侧受拉. 弯矩 反弯点位置随挡土高度不同而不同,对于泥面标高 ∇ -14.0 m、挡土高度 18 m 的工况,弯矩反弯点在标高 ∇ -16 m ~ ∇ -17 m 之间;对于泥面标高 ∇ -17.0 m、挡土 高度 21 m 的工况,反弯点在标高 ∇ -18 m ~ ∇ -19 m 之 间. 最大单宽正弯矩出现在标高 ∇ -10.5 m ~ ∇ -10.7 m, 最大单宽负弯矩出现在标高 ∇ -21.3 m 附近.



Fig. 3 Distribution of bending moment of the front wall

对于同一类型的前墙,其弯矩分布形态相近,最大正弯矩值随挡土高度的增大而增大,对于地连墙模型, M2(挡土高度为21 m)的最大弯矩值(1 580 kN·m/m)大于 M1 的(1 225 kN·m/m).虽然模型 M2 的最大 负弯矩值为(-520 kN·m/m)小于模型 M1(-950 kN·m/m),但最大正负弯矩的差值仍是 M2 模型的较大. 钢板桩墙模型(M3 和 M4)的弯矩分布与地连墙模型(M1 和 M2)基本相似,即挡土高度越大,最大正弯矩值 和最大正负弯矩的差值也越大.

当挡土高度相同时,前墙单宽弯矩特征值与前墙类型有关(见图3),表现为刚度越大最大正弯矩也越大,刚度小的钢板桩前墙的最大单宽正弯矩值或最大单宽正负弯矩的差值也较小.这是由于刚度小的挠曲变形较大,荷载在局部就能有所调整,并通过自身的变形把内力合理地分配到整个墙体.

2.2 锚碇地连墙弯矩分布

在单锚板桩码头结构中,锚碇地连墙一方面承受墙体海陆两侧的土压力以及墙土界面之间的摩擦力,另一方面承受拉杆力.4组模型工况的锚碇地连墙弯矩分布见图4(锚碇地连墙弯矩仍以墙体海侧受拉为正). 从图4可见,锚碇地连墙弯矩图均有2个反弯点,且均分别在标高▽-3.8 m 和▽-6.5 m 附近,最大正负弯 矩值分别出现在标高▽-7.5 m 和▽-5.2 m 附近,其中模型 M4 的最大正、负弯矩值最大,分别为 920 和 -870 kN·m/m.

对于同一类型前墙,挡土高度较小的锚碇地连墙的 单宽弯矩较小;当挡土高度相同时,钢板桩前墙(模型 M3 和 M4)的锚碇地连墙的最大正负弯矩值均分别大于地连 墙前墙(模型 M1 和 M2).由此可见,前墙的刚度对锚碇 地连墙的受力变形特性也有影响.前述分析表明,前墙刚 度较小,其弯矩较小,但图 4 显示,挡土高度相同、前墙刚 度较小的锚碇墙体内的弯矩反而较大,这表明前墙变形 调整内力的影响范围很大,已影响到锚碇墙的弯矩.





2.3 前墙陆侧土压力分布

在各种码头结构中,板桩结构码头的前墙,因自身挠曲变形明显而被视作一种柔性挡土结构^[10],故其侧向土压力分布最为复杂.本次模型试验中观测到钢板桩前墙因墙体挠曲变形较大,一些侧向土压力测试结果表现异常,在此未予列出,需进一步研究.相对而言,地连墙前墙刚度较大,墙身挠曲变形较小,实测的土压力结果见图 5.可见,2种挡土高度的墙侧土压力分布均呈典型的 R 形分布.这种 R 形土压力分布再次表明土

压力与墙体变形之间的关系,在单锚式板桩码头结构中, 前墙上端有拉杆的约束作用,使得这段墙体位移较小,变 形不大;前墙下部人土段的变形也较小;而泥面和锚固点 之间的中间段墙体变形较大,土压力重分布明显,即有拱 效应,使得变形较大的中间段墙体所受的侧向土压力最 小.试验测得 2 种挡土高度的最小土压力均在港池泥面 附近,说明前墙在泥面附近与陆侧挡土之间的相对变形 较大^[10].

从图 5 还可以看到,就这 2 种挡土高度而言,土压力 实测值基本都在 100 kPa 以内,挡土高度较大时,泥面以 上墙体陆侧土压力较大,而在泥面以下的入土段墙体侧 向土压力则较小.说明前墙挡土高度对前墙的受力变形 有一定的影响.



Fig. 5 Shoreward earth pressure of the front wall

2.4 前墙海侧土压力分布

前墙海侧土压力测试结果见图 6. 可见,海侧土压力 先随埋深增大,在入土段中间部分达到最大值后逐渐减 小,在前墙底端趋于最小. 挡土高度不同,土压力的分布 也不同,挡土高度较大的(模型 M2 和 M4)土压力峰值大 于挡土高度较小的(模型 M1 和 M3). 前墙的挠曲变形会 影响到墙前土压力的分布,刚度较小而变形较大的钢板 桩前墙的土压力峰值大于相同条件下刚度较大而变形较 小的地连墙上的土压力峰值.

2.5 锚碇地连墙海侧土压力分布

锚碇地连墙海侧土压力测试结果见图 7. 可见,模型 M1,M3 和 M4 中测得的土压力分布曲线均呈反R 形,即 墙侧土压力有个最小值,位于墙高中点附近.模型 M2 中 的上部土压力值比模型 M1 中的小,模型 M4 中的上部土 压力值比模型 M3 的小.这是由于锚碇地连墙完全位于地 基土层内,各个面均与土相接触,它在法向承受海陆两侧 土压力作用(两侧的压力差即为拉杆的锚固力).由于海 侧土压力总是大于陆侧土压力,与之相邻的海侧土体在 向海侧位移时,产生一反作用力.由于墙面有摩擦,使锚 碇地连墙有向上运动的趋势,从而影响海侧土压力的分 布.当前墙刚度大、挡土高度大,即自身内力协调能力较 差时受其影响更为明显.

2.6 拉杆内力

对于单锚板桩结构码头而言,拉杆是将锚碇墙和前



Fig. 6 Seaward earth pressure of the front wall



the anchor diaphragm wall

墙等多个构件连接成整体的关键部件.影响拉杆力的因素除了自身截面抗拉刚度外,还有前墙入土深度和抗 弯刚度、锚碇墙有效锚固深度及抗弯刚度、地基土特性、运营过程中的外荷载等,另外,还受拉杆初始紧张程 度、拉杆自重挠曲等因素的影响.每组模型设有4根测量拉杆,其中2根拉杆各设有1个测点(编号为1atd1 和2atd1),另2根各设有2个测点(编号为3atd1、3atd2、4atd1和4atd2),拉杆力测试结果见图8.可见,挡土 高度高的拉杆力比较大;挡土高度相同时,刚度大的地连板桩墙模型中的拉杆力比较大.



Fig. 8 Statistical diaphragm of tensile force of tie-rods

2.7 前墙、锚碇地连墙的水平位移及结构的整体稳定性

在码头前沿开挖土体形成港池后,前墙在陆侧土压力的作用下,向海侧发生侧向变形,引发墙后相邻的 地基土体也向海侧压缩变形,锚碇地连墙在拉杆作用下,带动海侧相邻土体也向海侧侧向变形.同时,前墙受 拉杆约束作用不致发生过大位移,由此来满足结构的整体稳定性.因此,前墙、锚碇地连墙侧向位移的大小不 仅与地基土体的特性有关,还与码头各构件的刚度与变形特性以及相互间的内在连接形式有关.就本次试验 条件而言,模型 M1 ~ M4 中前墙水平位移值依次为 38,48,43 和 52 mm;锚碇地连墙水平位移值依次为 24, 31,28 和 34 mm.

这一试验结果表明,前墙的水平位移大于锚碇地连墙;挡土高度相同时,刚度大的地连板桩前墙的水平 位移值较小.需要说明的是,试验过程中模型码头没有出现倾覆、构件开裂、拉杆承载力不够等现象.因此,所 模拟的 25 m 高的前墙发生 2‰相对水平位移时,单锚结构板桩码头处于稳定状态.

3 结 语

(1)码头前沿港池开挖深度较大时,前墙的最大正、负弯矩绝对值之差也较大.前墙刚度越大,最大正弯 矩越大,而最大负弯矩则变小,表明前墙变形协调能力越差.同时也说明前墙正、负弯矩值与前墙的入土深度 和刚度密切相关;

(2)刚度较大的地连墙前墙陆侧土压力分布呈 R 形,前墙海侧土压力随入土深度先增大后减小;刚度较小的钢板桩前墙,由于其变形较大,土压力分布尚需进一步研究.总之,板桩墙侧向土压力与墙身变形密切相关,受墙体刚度影响显著;

(3)港池开挖较深时,锚碇地连墙的最大正、负弯矩值均较大;前墙刚度较小时,锚碇地连墙的最大正、 负弯矩值较大,说明前墙刚度较小时锚碇地连墙的受力反而大.这是由于刚度较小的前墙的变形较大,导致 锚碇点处土压力集中,拉杆力增大.锚碇地连墙海侧土压力分布影响因素较为复杂,试验结果也反映了这种 结构与土相互作用的复杂性;

(4) 港池开挖较深时拉杆力较大. 挡土高度相同时, 刚度大的地连墙前墙中的拉杆力大于刚度小的;

(5)前墙的水平位移大于锚碇地连墙. 挡土高度相同时, 刚度大的地连板桩前墙的水平位移小于刚度小的.

参考文献:

- [1] 陈万佳. 港口水工建筑物[M]. 北京:人民交通出版社, 1989.
- [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.
- [3] 陈忠汉,程丽萍. 深基坑工程[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999.
- [4] JTJ292-98, 板桩码头设计与施工规范[S].
- [5] 王浩芬. 有锚板桩墙计算方法[J]. 港工技术, 1989, (1): 10-22.
- [6] 王多银. 一种计算板桩墙的数解法[J]. 重庆交通学院院报, 1995, 114(4): 98-104.
- [7] 徐光明,蔡正银,曾友金,等. 京唐港18#、19#泊位卸荷式地连墙板桩方案离心模型试验研究报告[R]. 南京:南京水利科学研究院,2006.
- [8] 刘永绣,吴荔丹,徐光明,等. 遮帘式板桩码头工作机制[J]. 水利水运工程学报, 2006, (2):8-12.
- [9] 徐光明,陈爱忠,曾友金,等. 超重力场中界面土压力的测量[J]. 岩土力学, 2007, 28(12): 2671-2674.
- [10] Tsinker G P. Handbook of Port and Harbor Engineering: Geotechnical and Structural Aspects [M]. New York: ITP International Thomson Publishing, Chapman & Hall Press, 1997.