DOI: 10.16198/j.cnki.1009-640X.2015.05.003

贡金鑫,高树飞,陈浩群,等. 桶式基础气压模型试验和有限元分析[J]. 水利水运工程学报, 2015(5): 21-29. (GONG Jinxin, GAO Shu-fei, CHEN Hao-qun, et al. Pneumatic experiment and finite element analysis of bucket foundation model[J]. Hydro-Science and Engineering, 2015(5): 21-29.)

桶式基础气压模型试验和有限元分析

贡金鑫1, 高树飞1, 陈浩群2, 沈雪松3

(1. 大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024; 2. 中交第三航务工程勘察设计院, 上海 200032; 3. 连云港市港口管理局, 江苏 连云港 222000)

摘要:桶式基础结构是一种适用于软土地基的新型海工结构。为保证结构的可靠性,已对桶式基础使用期的 承载力、稳定性和水动力特性进行了大量试验研究,但施工阶段的性状并未得到足够关注。为此制作了1:8的 小比尺模型并进行室内试验,研究设计规定的正压和负压下结构模型的内力、变形和气密性,获取了测点应变-加载时间的关系曲线。采用通用有限元软件 ABAQUS 对模型进行了弹性有限元分析并与试验结果比较。研究 表明,桶式基础模型能承受设计规定的正压力和负压力,模型混凝土和钢筋应变变化规律与加压规律大体相 符;弹性有限元分析结果与试验结果基本吻合。

关键 词:防波堤;桶式结构;模型试验;气密性;有限元分析

中图分类号: U656.2 文献标志码: A 文章编号:1009-640X(2015)05-0021-09

桶式基础防波堤是一种新型掩护结构,其特点是可以更好地适应软基、大浪条件,在较深水域相对经济, 还具有海上浮运、下沉施工简单(负压下沉)等优点,故连云港港徐圩港区防波堤采用这一结构型式^[1]。尽 管箱筒型基础^[2](与桶式基础类似的结构)防波堤已成功应用在天津港,但连云港港徐圩港区采用的防波堤 结构形式与天津港采用的结构形式不同。已进行的试验和研究都是针对地基土、地基相互作用^[3-4]、结构稳 定性^[5-6]及水动力特性^[7],没有对防波堤在施工期的结构性能进行专门研究,可能会因考虑不周而产生各种 隐患。例如,天津港集团南疆东部港区北围埝工程二标段采用了筒型基础结构防波堤,结合工程施工,2007 年对筒型基础结构的桶盖板、下部连接墙和上部连接墙的内力进行了测试。测试发现下沉阶段钢筋受力最 大,上部箱桶连接墙在该阶段的钢筋应力超过了屈服强度,混凝土已开裂。根据测试结果,对基础结构设计 进行了修改^[8]。由此可见,施工过程中基础结构的性能非常重要。本文对按照连云港港徐圩港区防波堤工 程桶式基础制作的1:8小比尺模型进行了室内试验^[9],模拟基础海上浮运和负压下沉工况,监测了试验过程 中基础模型的变形,并进行了有限元分析,为连云港港徐圩港区防波堤工程提供技术支持。

1 模型制作和试验方案

1.1 模型制作

考虑地基条件和水深,连云港港徐圩港区防波堤工程采用了桶式基础结构方案。施工前桶式基础先在 陆地预制好,施工时将基础托运到施工地点,然后通过抽取基础内的水和淤泥将基础沉到预定标高。在浮运 过程中,基础受自重作用产生浮托力,桶内产生正气压;基础抽气下沉时产生负气压。无论是正压还是负压,

收稿日期: 2014-12-29

基金项目:交通运输部西部交通建设科技项目(20113288231510)

作者简介:贡金鑫(1964—),男,河北衡水人,教授,主要从事钢筋混凝土结构基本理论研究。

E-mail: gong_jx.vip@ eyou. com

如果基础混凝土开裂,都会影响施工,甚至无法完成施工,因此需要研究施工过程中桶式基础承受完成施工 所需气压的能力。

为此,按照连云港港徐圩港区防波堤工程桶式基础的设计原型,制作了比尺 1:8的模型(下层桶),如图 1 所示。模型 A~G 共有 9 个仓,仓与仓之间互不连通。模型使用的混凝土等级(C40)和钢筋配筋率与原型 结构相同,结构轮廓尺寸、壁厚按比例确定,钢筋直径和间距如表 1 所示。图 2 为模型的钢筋和模板。在相同的正压和负压下,对 1:8模型和原型结构进行了弹性有限元分析,结果表明模型和原型相同位置的应变和 应力一致,即模型与原型相似^[9]。



图 1 模型结构(单位:mm) Fig. 1 Schematic graph of a model structure (unit: mm)

采用商品混凝土,配合比为:水泥(42.5R)、河砂、碎石、水、U-3 防冻剂和粉煤灰分别为 430,666,1 039, 153,17.9 和 80 kg/m³,坍落度为180 mm。在浇筑模型 的同时制作了 6 个标准混凝土立方体试块。达到 28 d 龄期时对立方体试块进行抗压试验,测得 1#~6#的混凝 土实际抗压强度分别为:45.45,46.14,42.18,42.12, 34.65 和 42.65 MPa。6 个试块中,除 1 个试块强度小于 40 MPa 外,其余都大于 40 MPa,可以认为混凝土质量满 足要求。对试验中使用的 HPB235 钢筋进行拉伸试验, 测得钢筋屈服强度为273 MPa,极限强度为 305.3 MPa。



图 2 模型钢筋与模板 Fig. 2 Reinforcement and formwork of a model

表 1		试验模型配筋
Tab. 1	Rei	inforcement of a model

位置	钢筋方向	配筋	钢筋方向	配筋	
平板(外壁直线段)	横向	<i>φ</i> 6@ 150	纵向	$\phi 6@~200$	
柱壳(外壁弧线段)	横向	<i>φ</i> 6@ 150	纵向	$\phi 6@~200$	
长轴向隔板	横向(底部0.5 m)	$\phi 6@~100$	横向(上部 0.625 m)	$\phi 6@~150$	
长轴向隔板	纵向(两侧隔仓)	<i>φ</i> 6@ 150	纵向(中间隔仓)	$\phi 6@~200$	
短轴向隔板	横向	<i>φ</i> 6@ 150	纵向	$\phi 6@~200$	
顶板	横向	$\phi 6@\ 100$	纵向	$\phi 6@80$	

1.2 试验设备与量测仪器

试验采用的设备及布置方式如图 3 所示。试验前模型放于装有融化沥青的钢槽内,待槽内沥青凝固后进行正压和负压试验。采用空气压缩机向桶内施加正气压,采用真空泵向桶内施加负气压,分别模拟海上浮运和负压下沉两种工况。为方便表示,图中正压和负压管道用两幅图,实际试验中正压试验和负压试验先后进行,通气管道并行设置。



图 3 试验设备布置方式



为了监测正压试验和负压试验中模型关键位置的钢筋应变和混凝土应变,模型制作前在判断拉应力比 较大的钢筋上粘贴了钢筋应变片,并在拉应力比较大的混凝土表面粘贴了混凝土应变片。采用德国产的 32 通道和 64 通道静态应变仪采集钢筋混凝土的应变数据。

1.3 试验步骤

负压试验加载步骤如下(括号内时间为气压变化过程中实际记录的时间):抽气(81 kPa),约 40 min)→ 停止抽气(81~61 kPa,自然降低,约 125 min)→继续抽气(61~86 kPa,约 25 min)→停止抽气(86~61 kPa,约 30 min)→打开气阀释放压力(61~0 kPa,约 40 min)。

正压试验加载步骤如下:充气(0~56 kPa,约 25 min)→停止充气(56~41 kPa,自然降低,约130 min)→ 继续充气(41~56 kPa,约 20 min)→停止充气(56~51 kPa,自然降低,约 20 min)→打开气阀释放压力(51~0 kPa,约 20 min)。

2 试验结果与讨论

2.1 负压加载

2.1.1 混凝土应力 负压加载时模型顶板下表面 PV2, PV3,PV4,PV5,PV6,PV7,PV8 处和顶板上表面 TP6 处 (图4)的混凝土应变如图 5(a)~(h)所示,图中应变正 值表示受拉,这些位置的混凝土处于弯拉状态,是可能开 裂的位置。由图 5 可见,监测点的应变变化与压差变化 基本一致。试验采用 C40 混凝土,根据《水运工程混凝 土结构设计规范》(JTS 151—2011)^[10],相应的弹性模量 为 3. 25 × 10⁴MPa,抗拉强度标准值为f_{ik} = 2. 39 MPa。模 型上述位置混凝土的最大拉应力由混凝土应变-时间曲 线上的最大应变乘混凝土弹性模量得到,模型顶板下表



图 4 负压加载时混凝土和钢筋应变测点

Fig. 4 Monitoring points under negative pressure loading

面 PV2~PV8 和顶板上表面 TP6 的拉应力为 1.51,3.28,1.28,0.84,1.49,3.02,1.69 和 3.37 MPa。如果考虑受弯构件混凝土开裂前有一定的塑性,按规范考虑 1.55 的混凝土塑性系数,则 C40 混凝土开裂应力为







2.1.2 钢筋应力 如图 4 和图 6(a) 所示,负压加载时,模型顶板钢筋测点 BR1 位于顶板内侧,TR3 位于顶 板外侧,SO13 钢筋测点在外壁直线段内侧,SE8 和 SV2 分别在外壁曲线段内侧和外侧。图 7 为模型的气压-时间曲线和上述测点钢筋的应变-时间曲线,图中正值为拉应变,负值为压应变。由图 7 可见,监测点的应 变变化与压差变化基本一致,但有较大波动。将钢筋弹性模量乘以各测点钢筋应变-时间曲线上的最大应 变,得到测点 BR1,TR3, SO13,SE8 和 SV2 的钢筋应力分别为 0.84,16.80,-25.20,10.71 和-1.79 MPa(正 值为拉应力,负值为压应力)。混凝土的开裂应变为(1~1.5)×10⁻⁴,HPB235 钢筋的弹性模量为 2×10⁵MPa, 这样混凝土开裂时钢筋的应力为(1~1.5)×10⁻⁴×2×10⁵ = 20~30 MPa。由此可见,在达到设计规定的负压 时,钢筋应力很低,起的作用还很小。



图 6 钢筋应变测点(单位:mm)







2.2 正压加载

如图 6(b) 所示,正压加载时试验模型侧壁弧线段外表面混凝土 SH5, SV4, SH2 和 SV3 位置受弯拉,是 混凝土可能开裂的位置。充气过程中气压变化及上述测点混凝土的应变-时间曲线如图 8(a)~(d)所示,图 中正值为拉应变,负值为压应变。由图 8 可以看出,监测点的应变变化与压差变化基本一致。按实测最大应 变计算得到的 SH5, SV4, SH2 和 SV3 点混凝土最大应力分别为:1.11,1.01,1.33 和 0.45 MPa,均小于混凝 土开裂拉应力 2.39 MPa。需要说明的是,正压时侧壁混凝土处于轴心或偏心受拉状态,混凝土开裂时不会 出现塑性,所以不需考虑混凝土塑性系数。



Fig. 8 Air pressure and concrete strain time-history of a model under positive pressure loading

2.3 讨论

在上述负压加载和正压加载步骤中,安排了步骤"停止抽气(8~61 kPa,自然降低)"和"停止充气(56~41 kPa,自然降低)",目的是研究模型的气密性。在两个步骤中,如果不再抽气或充气,通气管道和模型混凝土也完全不透气,则经历很长时间,气压不会下降。实际上,这是一种理想状态。首先,管道接头不可能做到完全密封,试验前对本试验的每根抽气管道和充气管道气密性都做了严格测试,使气压降低每小时不超过10 kPa;其次,众所周知,混凝土本身属于多孔隙材料,即加载前就存在微孔隙。所以,在停止加压的情况下,桶内气压降低是正常的,但要控制降低的速度。如果降低很快,则可能出现裂缝。

3 有限元模拟

3.1 有限元模型

采用 ABAQUS 软件对桶式基础模型进行了有限元模拟。混凝土采用 C3D20 单元(20 节点六面体二次完全积分单元),钢筋采用 T3D2 单元(三维 2 节点桁架单元),分析采用分离式模型,并采用 Embedded region 命令将钢筋耦 合在试验结构内。由于规定气压下桶式模型基本处于弹性状态,所以按弹性方 法进行分析。混凝土(C40)和钢筋(HPB235)的弹性模量分别为 3.25×10⁴和 2.1×10⁵ MPa,密度为 2 500 和 7 800 kg/m³,泊松比为 0.167 和 0.3。另外,本 文也对桶式模型进行了弹塑性分析,由于混凝土的本构关系复杂,参数较多,不 容易准确确定,分析结果与试验结果符合性差,本文不再介绍。

有限元模型如图 9 所示。对于负压和正压试验,模型的约束条件为约束桶 底部的竖向位移(Z向);约束外壁与沥青接触部分的对称中线的 X,Y 向平动 自由度。求解时,对于负压试验,各隔仓压力相同,下桶壁板和顶板承受均布负



图 9 结构有限元模型 Fig. 9 FE model of structure

压(81 kPa),并考虑结构本身自重;对于正压试验,各隔仓压力相同,下桶壁板和顶板承受均布压力 (56 kPa),并考虑结构本身自重。建立多个分析步,每个分析步的荷载为 10 kPa,对于正压试验,最后一个 分析步的荷载为 5 kPa。

3.2 有限元分析结果

分析得到各模型模拟负压和正压试验的应变和应力云图,同时给出试验中测点对应的应变和应力,柱壳 的应变和应力结果在柱坐标系中表示,其余部分的应变和应力结果在直角坐标系中表示,两个坐标系的原点 相同,柱坐标系的 Z 轴和直角坐标系的 Z 轴重合。对于柱坐标系,图中 S22,E22 为环向正应力和正应变; S33,E33 为竖向正应力和正应变。对于直角坐标系,图中 S11 和 E11 为 X 向正应力和正应变。

负压时顶板上表面及下表面的应变和应力云图分别如图 10 和 11 所示,混凝土测点的有限元分析结果 和试验结果对比如表 2 所示。



表 2 负压加载下混凝土应变和应力有限元计算结果与试验结果对比

测点	应变/10-5		应力/MPa		and E	应变/10-5		应力/MPa	
	试验	计算	试验	计算	侧点	试验	计算	试验	计算
PV2	4.64	5.16	1.51	1.87	PV6	4. 58	3.16	1.49	1.24
PV3	10.1	9.09	3.28	3.14	PV7	9.29	9.09	3.02	3.14
PV4	3.93	3.16	1.28	1.24	PV8	5.20	5.16	1.69	1.87
PV5	2.58	2.68	0.84	1.09	TP6	10.4	12.90	3.37	4.20

Tab. 2	Strains and	stresses	comparison	between	FE	analysis	and	experiment	under	negative	pressure	loadii	ng
						•							~~~

由表2可看出,总体上有限元分析结果接近于试验结果,尽管测点TP6的混凝土拉应力略大于开裂应力(3.70 MPa),但这仅发生在该点,而结构出现裂缝需达到一定的范围,不会因为一个点达到混凝土拉应力就开裂。

正压时柱壳环向及竖向正应变和正应力云图分别如图 12 和 13 所示。混凝土测点的有限元分析结果和 试验结果对比如表 3 所示。由表 3 可看出,有限元分析结果基本接近于试验结果,有限元计算应力均未达到 混凝土抗拉强度,符合裂缝控制要求。



Fig. 12 Circular strains and stresses of cylindrical shell

Fig. 13 Vertical strains and stresses of cylindrical shell

表 3 正压加载下模型混凝土有限元计算结果与试验结果对比

Tab. 3 Strains and stresses comparison between FE analysis and experiment under positive pressure loading

测点 -	应变/10-5		应力/MPa		测占	应变/10-5		应力/MPa	
	试验	计算	试验	计算	例尽	试验	计算	试验	计算
SH5	3.42	4.14	1.11	1.7	SH2	4.09	3.63	1.33	1.62
SV4	3.11	2.06	1.01	0. 94	SV3	1.37	1.03	0.45	0. 49

4 结 语

本文对比尺1:8的桶式基础模型进行了海上浮运和负压下沉工况模拟试验和有限元分析,得出如下 结论:

(1)试验模型能承受设计规定的正压力和负压力,验证了结构设计的合理性,为进一步优化结构设计奠定了基础,达到了试验目的。

(2)在设计规定的气压下,按弹性有限元计算得到的应变和应力总体上与试验结果接近,反映了试验结果的合理性。

(3)混凝土是一种准脆性材料,性能随机性大。为保证桶式基础海上浮运和负压下沉过程中性能可靠,仍需采取一定的后备措施。

参考文献:

- [1] 陈浩群,李武. 新型结构在连云港港口工程中的应用[J]. 水运工程, 2013(10): 83-88. (CHEN Hao-qun, LI Wu. Application of new hydraulic structure in Lianyungang port engineering [J]. Port and Waterway Engineering, 2013(10): 83-88. (in Chinese))
- [2] 肖忠,王元战,及春宁. 基于极限平衡法的箱筒型基础防波堤稳定性分析[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(5): 828-833.
 (XIAO Zhong, WANG Yuan-zhan, JI Chun-ning. Stability analysis of bucket foundation breakwaters based on limit equilibrium method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(5): 828-833. (in Chinese))
- [3] 高志伟,陈甦,李武,等. 桶式基础结构土压力分布规律[J]. 中国港湾建设, 2013(1): 18-21. (GAO Zhi-wei, CHEN Su, LI Wu, et al. Pattern of distribution of soil pressure on bucket foundation[J]. China Harbour Engineering, 2013(1): 18-21. (in Chinese))
- [4] 高志伟,李亚,高树飞,等. 徐圩防波堤工程桶式基础结构设计[J]. 水运工程, 2013(10): 89-94. (GAO Zhi-wei, LI Ya, GAO Shu-fei, et al. Bucket foundation structure design of Xuwei breakwater[J]. Port and Waterway Engineering, 2013(10): 89-94. (in Chinese))
- [5] 李武, 吴青松, 陈甦, 等. 桶式基础结构稳定性试验研究[J]. 水利水运工程学报, 2012(5): 42-47. (LI Wu, WU Qing-

29

song, CHEN Su, et al. Stability tests of bucket-based structure [J]. Hydro-Science and Engineering, 2012(5): 42-47. (in Chinese))

- [6] 李武,陈甦,程泽坤,等.水平荷载作用下桶式基础结构稳定性研究[J].中国港湾建设,2012(5):14-18.(LI Wu, CHEN Su, CHENG Ze-kun, et al. Stability study of bucket-based structure on horizontal loading [J]. China Harbour Engineering, 2012(5):14-18. (in Chinese))
- [7] 蔡正银,徐光明,顾行文,等. 波浪荷载作用下箱筒型基础防波堤性状试验研究[J]. 中国港湾建设, 2010(增1): 90-94, 99. (CAI Zheng-yin, XU Guang-ming, GU Xing-wen, et al. Behavior investigation on a cylindrical breakwater during wave loading[J]. China Harbour Engineering, 2010(Suppl1): 90-94, 99. (in Chinese))
- [8] 喻志发,朱耀庭,解林博. 箱筒型基础防波堤施工过程结构内力测试及分析[J]. 中国港湾建设, 2009(4): 12-15. (YU Zhi-fa, ZHU Yao-ting, XIE Lin-bo. Test and analysis on the structural internal force during the construction of box-type foundation breakwater [J]. China Harbour Engineering, 2009(4):12-15. (in Chinese))
- [9] 贡金鑫,高树飞,陈浩群,等. 连云港港徐圩港区防波堤工程桶式基础结构内力及构造研究[R]. 大连:大连理工大学, 2012.(GONG Jin-xin, GAO Shu-fei, CHEN Hao-qun, et al. Investigation on internal forces and details of bucket foundation breakwater in Xuwei port area for Lianyungang port[R]. Dalian: Dalian University of Technology, 2012. (in Chinese))
- [10] JTS 151—2011 水运工程混凝土结构设计规范[S]. (JTS 151—2011 Design code for concrete structures of port and waterway engineering[S]. (in Chinese))
- [11] GB/T 50082—2009 普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准[S].(GB/T 50082—2009 Standard for test methods of long-term performance and durability of ordinary concrete[S].(in Chinese))
- [12] 王金昌, 陈页开. ABAQUS 在土木工程中的应用[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2006. (WANG Jin-chang, CHEN Ye-kai. Application of ABAQUS in civil engineering[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2006. (in Chinese))

Pneumatic experiment and finite element analysis of bucket foundation model

GONG Jin-xin¹, GAO Shu-fei¹, CHEN Hao-qun², SHEN Xue-song³

(1. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 2. CCCC Third Harbor Consultants Co., Ltd., Shanghai 200032, China; 3. Lianyungang Administrating Bureau of Harbor 222000, China)

Abstract: The bucket foundation is a new kind of the marine structures which are suitable for application to soft soil. For its reliability, extensive experimental investigations have been conducted on its capacity, stability and hydrodynamic characteristics during service life, but less attention is paid to its behaviors during construction. A model scaled 1:8 is fabricated and experimented in the laboratory. The internal force, deformation and airtightness under specified positive and negative pressures were investigated, and the relationships between strain and loading duration of each monitoring point were recorded. Elastic finite element analyses were carried out by using a commercial software ABAQUS and the results were compared with those obtained from the indoor experiments. The research results show that the model behaved well during the experiment and the strain of concrete and steel bar approximately varied in parallel with the loading process. The results of the elastic finite element analysis agree well with the results of the indoor experiments.

Key words: breakwater; bucket foundation; model experiment; airtightness; finite element analysis