



大直径钢圆筒变形特性分析*

周红星^{1,2}, 董志良^{2,3}, 陈平山^{1,2}

(1. 中交四航工程研究院有限公司, 广东 广州 510230;

2. 中交交通基础工程环保与安全重点实验室, 广东 广州 510230;

3. 中交四航局第二工程有限公司, 广东 广州 510300)

摘要: 大直径钢圆筒已在国内外港口、跨海桥梁等工程中应用,但对于大直径钢圆筒的变形特性认识依然不足。基于国家科技支撑计划项目依托工程——港珠澳大桥东人工岛岛壁结构-钢圆筒的深层水平位移实测资料,结合数值模拟,对大直径钢圆筒变形特性进行探讨。实测资料和数值模拟结果表明:钢圆筒结构随着筒内土体固结程度,其变形特性近似于重力式结构。

关键词: 大直径钢圆筒; 港珠澳大桥; 人工岛; 变形特性

中图分类号: U 656.3; TU 391

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)03-0021-07

Deformation characteristics of large-diameter steel cylinders

ZHOU Hong-xing^{1,2}, DONG Zhi-liang^{2,3}, CHEN Pin-shan^{1,2}

(1. CCCC Fourth Harbor Engineering Institute Co., Ltd., Guangzhou 510230, China;

2. CCCC Key Lab of Environmental Protection & Safety in Foundation Engineering of Transportation, Guangzhou 510230, China;

3. The Second Engineering Company of CCCC Fourth Harbor Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510300, China)

Abstract: The large-diameter steel cylinders are applied to harbor and sea-crossing engineering. But there is still a lack of grasp of the deformation characteristics of the large diameter steel cylinders. Based on the measured data of the East Artificial Island of Hong Kong-Zhuhai-Macau bridge, we carry out the study on it. The result reveals that with the soil consolidating in the cylinder, the deformation characteristics of the steel cylinder is similar to that of the gravity structure.

Keywords: large-diameter steel cylinder; Hong Kong-Zhuhai-Macau bridge; artificial island; deformation characteristics

大直径圆筒结构始建于20世纪40年代后期法国勒阿弗尔港,后来在法国其它港口,如土伦港、敦克尔港、马赛港等地也相继应用。前苏联在20世纪60年代开始研究和推广应用大圆筒结构,并在理论分析和试验研究方面做了一些工作^[1-2]。我国在20世纪80年代初期开始引入大圆筒结构。最早建成的广东省沙角电厂导流堤(建于基床上)和三水小塘码头(插入式),自投产后至今使用正常。随后在一些大型深水码头与防波堤等港口水工建筑物中逐步得到应用。插入式钢圆筒作为深基坑的支护兼止水的主体结构,由于钢圆筒施工期稳定性好,施工速度快,整体强度要优于格型

钢板桩,在岸壁、防波堤和护岸工程中得到较为广泛的应用。2003年,此结构形式在广州蒲州海堤岸壁工程中也成功应用。但插入式钢圆筒用于外海大型深基坑支护兼止水结构,还尚属首例。

直接插入于海床原状地基土体的深插式大圆筒结构,特别是薄壁圆筒结构用以防御海浪、潮流及流冰等冲击的近海防护建筑物时,其静、动力分析涉及到海洋流体-结构-地基土体的三相耦合分析,尤其是结构与地基土体间复杂的相互作用使得此类结构的承载机理与破坏形态一直未有明确的界定,至今尚无可靠的理论、合理的计算方法和规范可循,这直接制约着此类结构在我国广

收稿日期: 2014-12-18

*基金项目: 国家科技支撑计划资助项目(2011BAG07B02)

作者简介: 周红星(1974—),男,博士后,工程师,从事岩土工程等方面的科研和设计。

大淤泥质海岸的推广应用。目前的研究主要集中在模型试验、数值计算方面的研究。

陈福全等^[3]通过室内模型试验,研究了作用在圆筒上的内外土压力分布规律、筒体基底反力分布情况,以及它们随结构加载的变化规律。

刘建起、陈宝珠^[4-5]采用模型试验对插入式圆筒结构进行实测,分析了不同荷载作用下纵向和环向弯矩及其最大值位置的变化规律;并对筒体受侧向荷载作用和筒后加超载工况圆筒结构的变位进行分析,提出了圆筒结构的变位控制值。

秦崇仁等^[6]在室内波浪水槽中进行了砂质底床上沉入式大直径圆筒结构施工期的稳定性试验研究。

天津大学^[7-10]曾于2002年在室外原状黏土地基上进行插入式大直径薄壁圆筒结构的大比尺物理模型试验。其研究成果,无论对施工过程控制、理论研究或是数值模拟的参数选取、模型简化均有一定的参考价值。

综上所述,为探寻圆筒结构上的筒体内外土压力及侧摩阻力分布规律以及筒体极限破坏情形下的变位机制,人们进行了很多相关试验,一直是学术界与工程界关注的焦点。但模型试验只能进行一些规律探寻,无法对大圆筒结构的承载机理与破坏模式进行具体描述,因此有必要以现场工程实例依托,研究实际尺寸大直径钢圆筒的变

形特性,为其设计计算方法奠定基础。为此,本文依托国家科技支撑计划项目,以港珠澳大桥东人工岛钢圆筒岛壁深层水平位移测试结果为基础,结合数值模拟,研究外海条件下大直径钢圆筒的变形特性。

1 工程概况

港珠澳大桥跨越珠江口伶仃洋海域,是连接香港、珠海、澳门的大型跨海通道工程,是国家高速公路网规划中珠江三角洲地区环线的组成部分和跨越伶仃洋海域的关键性工程。港珠澳大桥是由隧、岛、桥组成的跨海交通集群工程,是中国交通建设史上技术最复杂、环保要求最高、建设要求及标准最高的工程之一。

港珠澳大桥桥隧转换人工岛深基坑支护采用岛壁结构和基坑围护结构相结合的方案(图1)。利用大型起重船将预制的大直径钢圆筒沿人工岛外圈振沉至不透水层,并在圆筒之间打设两道直线型钢板桩构成副格仓,构筑安全、可靠的隧道基坑施工期止水围护结构,实现整岛快速止水的同时,避免采用传统基坑围护结构的内部支撑结构,扩大了岛上隧道施工作业面。整岛周边采用连续不透水钢圆筒和钢板深插入不透水层,相互之间依靠锁口止水;底部保留全部黏土层止水,并保留淤泥质土防止下卧黏性土中夹有透水砂层。

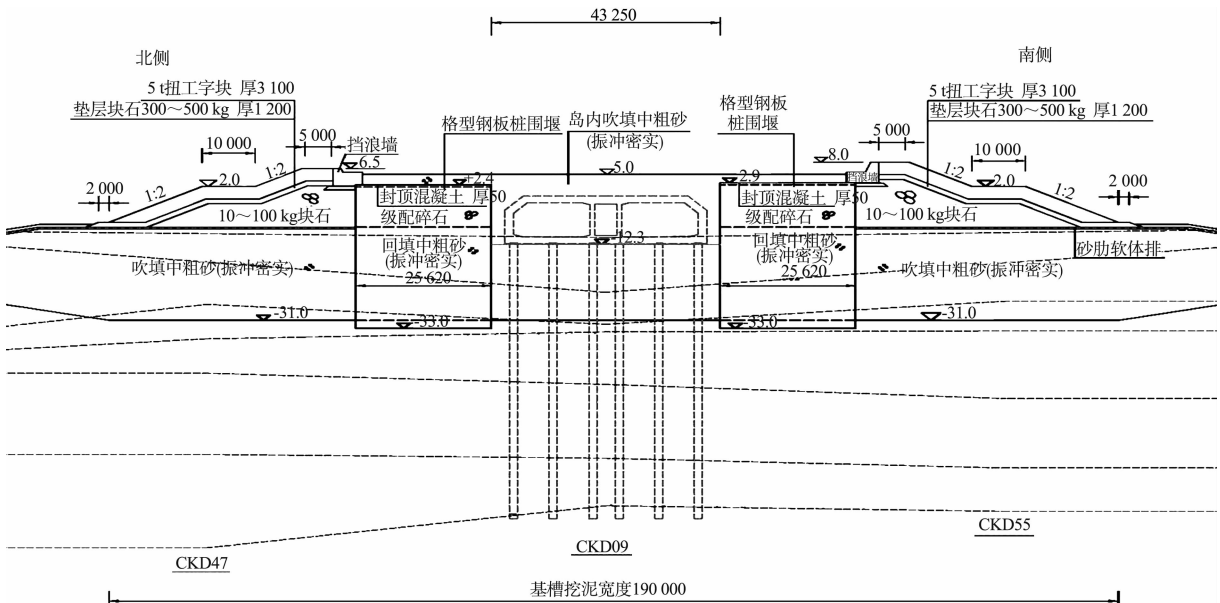
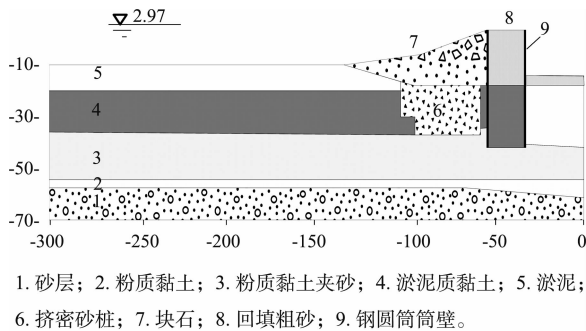


图1 人工岛典型断面(尺寸单位: mm, 高程单位: m)

人工岛区域海底地形平缓, 泥面高程为 $-9.50 \sim -10.35$ m, 地貌形态较为简单。海底以下主要有以下地层: 1) 第1 层: 全新世海相沉积 (Q_4^m 、 Q_4^d), 层底高程为 $-18.10 \sim -33.60$ m。主要为淤泥、淤泥质黏土。2) 第2 层: 晚更新世晚期陆相沉积物 (Q_3^{al+pl}), 该层仅在部分钻孔中揭露, 层底高程为 $-20.30 \sim -34.10$ m。主要为黏土。3) 第3 层: 晚更新世中期海陆过渡相沉积物 (Q_3^{m+al})。层底高程为 $-44.20 \sim -60.60$ m。主要为淤泥质黏土、黏土、粉质黏土夹砂、粉质黏土黏土。典型地质剖面见图 2。



1. 砂层; 2. 粉质黏土; 3. 粉质黏土夹砂; 4. 淤泥质黏土; 5. 淤泥; 6. 挤密砂桩; 7. 块石; 8. 回填粗砂; 9. 钢圆筒筒壁。

图 2 东人工典型地质剖面

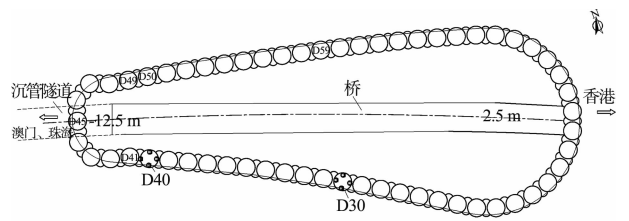
人工岛岛内和钢圆筒、副格基础处理主要采用堆载预压和降水, 钢圆筒外基础处理则主要采用挤密砂桩。

2 钢圆筒深层水平位移测试

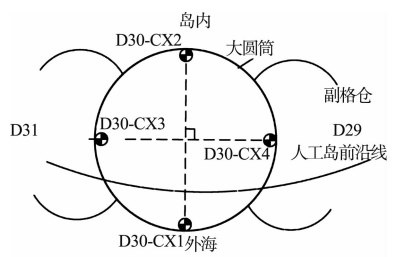
为研究依托工程大直径钢圆筒的变形特性, 考虑到 D40 处于沉管隧道和人工岛结合处, 而 D30 基本位于东人工岛南北方向最宽处, 因此在港珠澳东人工岛 D30、D40 两个大圆筒上布置了深层水平测斜管, 其布置位置见图 3。

有关测斜管以及其他测试仪器的埋设本文不再赘述, 测试结果见图 4、5。

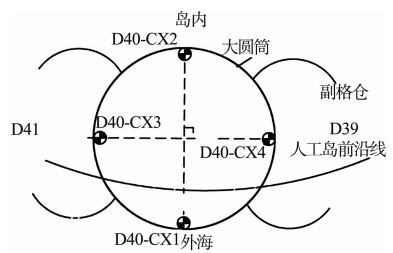
从图 4、5 可以看出, 钢圆筒变形有如下几个特点: 1) 钢圆筒整体上向岛内偏移; 2) 钢圆筒外海一侧变形要大于岛内侧, 钢圆筒体内的土体类似一个有一定刚度的弹簧, 吸取部分变形。



a) 东人工岛

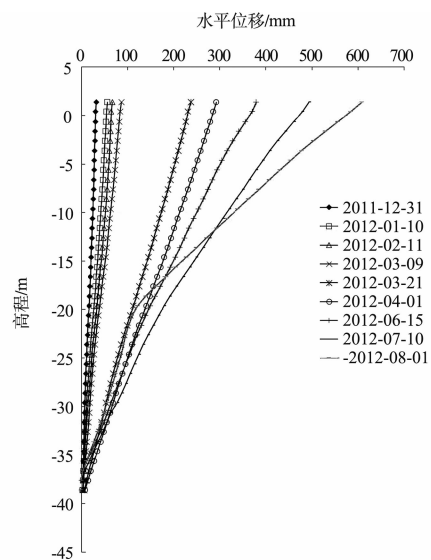


b) D30



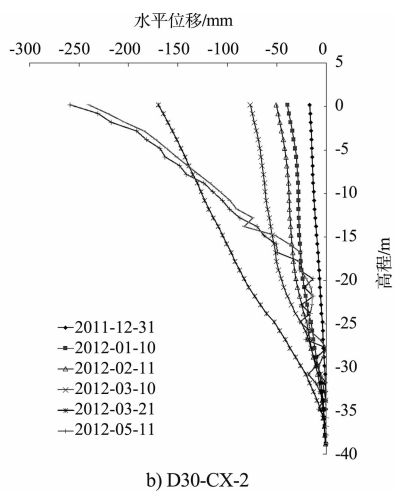
c) D40

图 3 钢圆筒测斜管平面布置



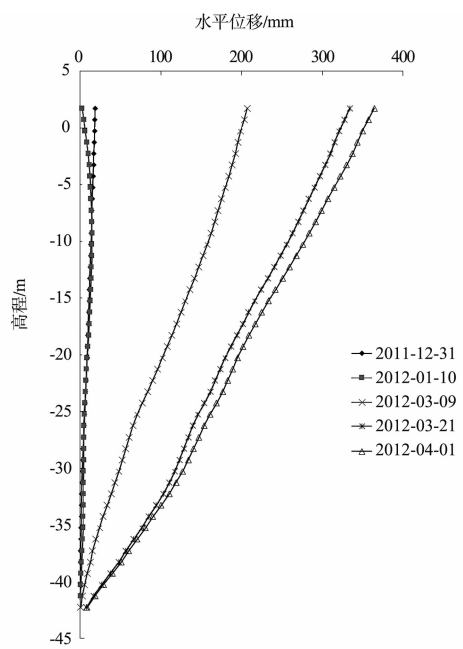
a) D30-CX-1

注: D30大圆筒顶高程3.5 m, 底高程-44.0 m, D30-CX-1测斜管顶高程2.38 m, 以向圆筒中心变形为正值。



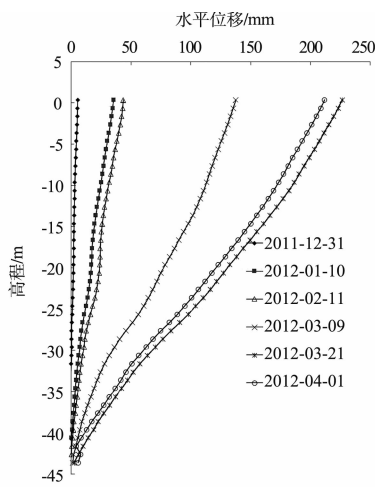
b) D30-CX-2

注: D30大圆筒顶高程3.5 m, 底高程-44.0 m, D30-CX-2测斜管顶高程2.2 m, 以向圆筒圆心变形为正值。



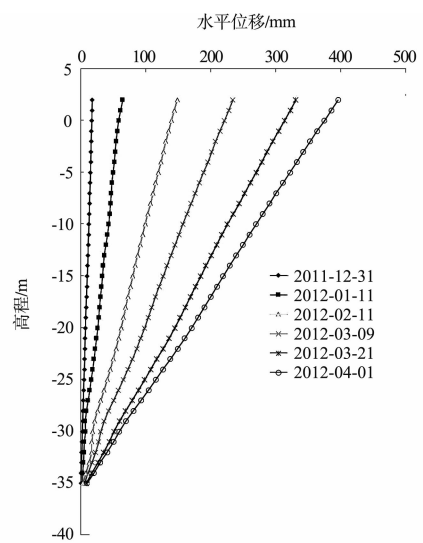
a) D40-CX-1

注: D40大圆筒顶高程3.5 m, 底高程-46.0 m, D40-CX-1测斜管顶高程2.23 m, 以向圆筒中心变形为正值。



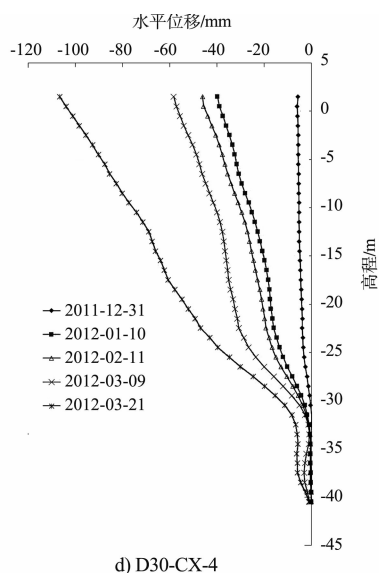
c) D30-CX-3

注: D30大圆筒顶高程3.5 m, 底高程-44.0 m, D30-CX-3测斜管顶高程2.37 m, 以向圆筒中心变形为正值。



b) D40-CX-3

注: D40大圆筒顶高程3.5 m, 底高程-46.0 m, D40-CX-3测斜管顶高程2.46 m, 以向圆筒中心变形为正值。



d) D30-CX-4

注: D30大圆筒顶高程3.5 m, 底高程-44.0 m, D30-CX-4测斜管顶高程2.01 m, 以向圆筒中心变形为正值。

图4 D30 测斜点深层水平位移测试结果

图5 D40 测斜点深层水平位移测试结果

3 数值模拟

从实测结果可以得出大直径钢圆筒的变形特性, 但实测受到多种因素的影响。因此, 本文利用商业软件 Midas 进行数值模拟, 对大直径钢圆筒变形特性进行研究, 并与实测结果对比。

大直径圆筒的特点是平面尺寸大且壁薄, 它与筒内土、筒前土和筒后土一起协同作用, 共同抵抗外荷载的作用, 由此可见大直径圆筒结构与

土的相互作用问题和其他结构形式相比是有区别的。孟庆文等^[11]针对大直径圆筒与土体相互作用的特点, 提出了一种新型的接触面单元来模拟壳体与土体的相互作用。该模型可以模拟筒壳与土体之间的滑移和土体的非线性特性。因此, 本研究主要基于已有研究成果, 采用 Goodman 接触单元模拟土体与钢圆筒之间相互接触作用。

对于土的本构模型, 本文采用弹塑性模型(德鲁克-普拉格模型)进行数值计算。分析模型尺寸取东人工岛一半(从 D16 至 D44)进行计算(图6)。

根据设计, 钢圆筒和副格仓打入粉质黏土夹砂、粉质黏土、黏土层不透水层, 钢圆筒上宽槽与副格仓两端焊接钢板形成的 T 型锁口连接, 并进行防渗防水处理。因此, 在计算中不考虑副格仓与钢圆筒间转动, 也无上下位移。模型的网格划分见图6。

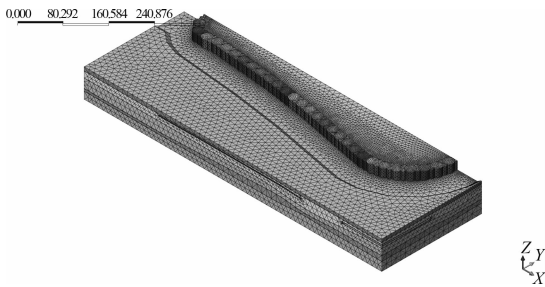


图6 模型网格划分

计算荷载主要有波浪荷载, 波浪荷载计算方法主要采用和田良实公式进行计算。海面以上水荷载直接作用在钢圆筒上, 并采用渗流-应力耦合计算。

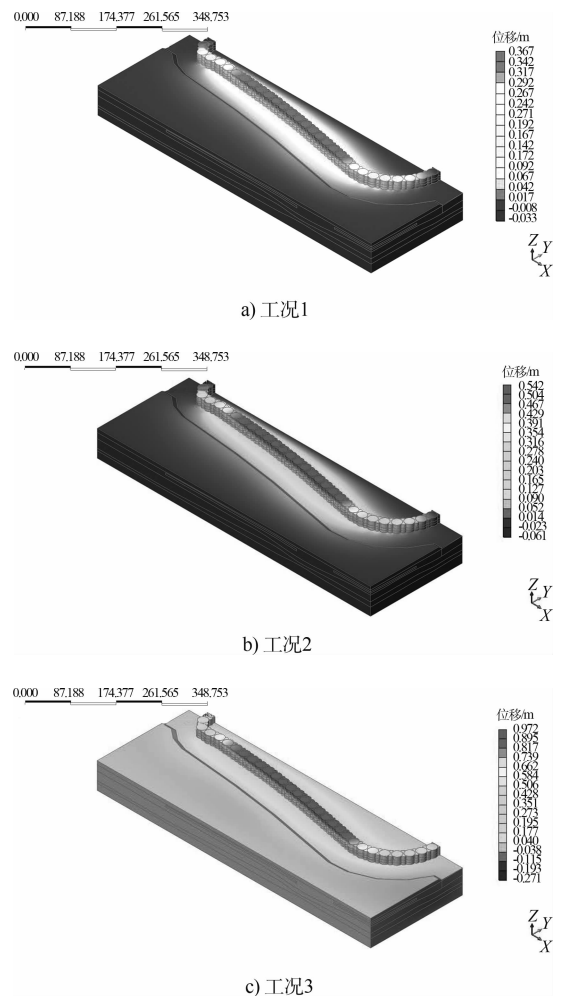
按照东人工岛现场施工工序和测试时期工况, 按6种工况进行模拟。1) 工况1: 海床已清底至-16.0 m, 回填砂至-16.0 m, 未进行软基处理, 人工岛围堰已合拢, 人工岛内降水至-2 m, 外海水位1.0 m, 未进行软基处理。2) 工况2: 人工岛内降水至-4 m, 外海水位1.0 m, 进行软基处理。3) 工况3: 人工岛内回填至-10.4 m, 人工岛内降水至-6 m, 外海水位1.0 m, 进行软基处理。4) 工况4: 人工岛内回填至-10.4 m, 人工岛内降水至-10 m, 外海水位1.0 m, 进行软基处

理。5) 工况5: 人工岛内回填至-5 m, 人工岛内降水至-16 m, 外海水位1.0 m, 进行软基处理。6) 工况6: 人工岛内回填至3.5 m, 人工岛内降水至-16 m, 外海水位1.0 m, 进行软基处理。土体参数见表1。

表1 土层计算参数

地层	压缩模量/ (kN·m ⁻²)	泊松比 μ	饱和密度/ (t·m ⁻³)	粘聚力/ (kN·m ⁻²)	摩擦角/ (°)
中粗砂	33 000	0.25	2.0	0	30.0
淤泥① ₂	1 800	0.38	1.7	6	0.5
黏土② ₁	4 500	0.30	1.9	34	3.7
粉质黏土夹砂③ ₂	4 300	0.30	1.7	20	12.2
淤泥质黏土③ ₁	3 070	0.30	1.7	18	3.0
黏土③ ₁₋₁	3 640	0.30	1.7	22	4.7
钢圆筒 Q345		0.30	7.8		

各工况 Y 轴方向位移(Y 轴正向指向岛内, X 轴正向指向香港方向, 以下相同) 见图7、8。



注: 图中线框为未变形前状况, 以下同。

图7 计算区域位移变形

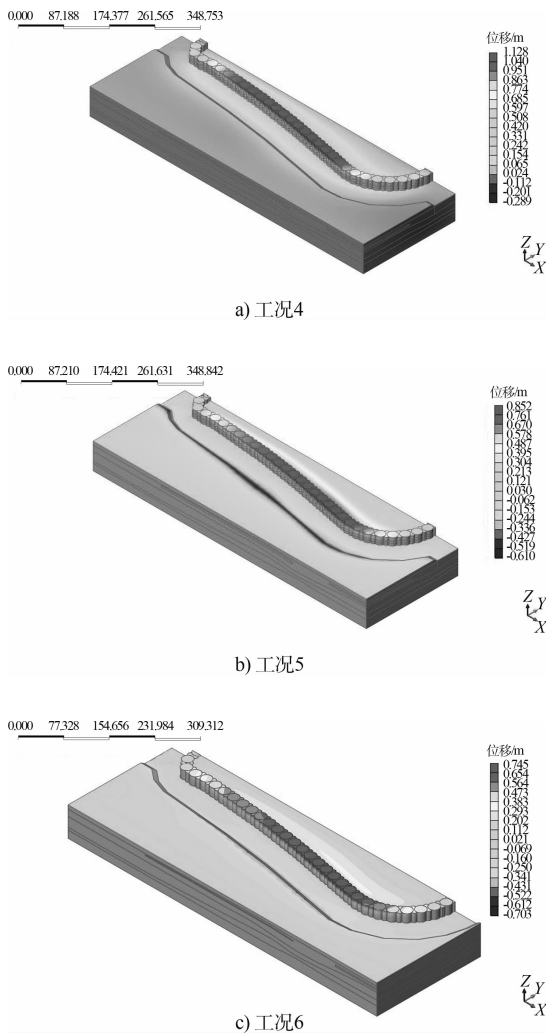
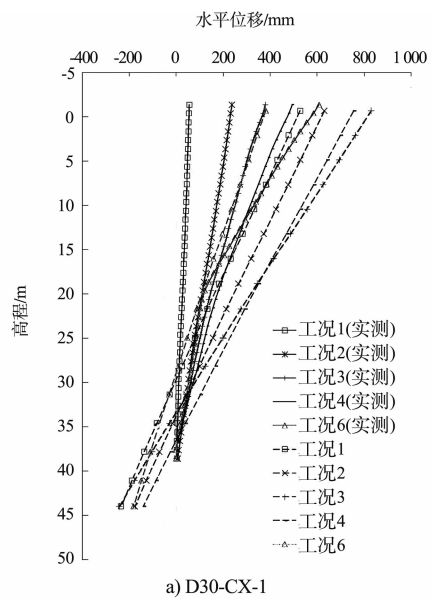


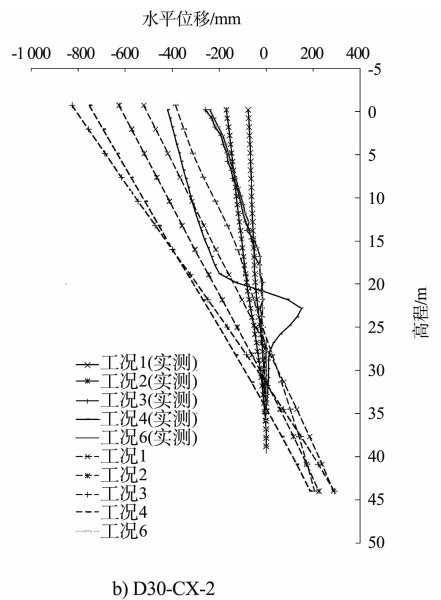
图8 钢圆筒壁Y方向平面位移

计算结果表明，钢圆筒整体向岛内偏移，其中D22~D43间偏移量最大，其中当岛内降水达到-10 m，岛内回填至-10.4 m时，钢圆筒向岛内偏移达到了最大值1.13 m。这与钢圆筒顶位移观测一致，D26筒顶最大位移Y方向累计达到1.12 m。随着岛内回填，钢圆筒变形，显然D22~D43间偏移量最大是与东岛钢圆筒空间结构相关，即D22~D43钢圆筒X方向的转动轴较长，约束力要小于岛两端头。

取D30钢圆筒计算结果与实测值对比(图9)，两者相差不大。数值模拟中D30在工况3，即岛内降水至-6 m，且未回填时偏移量达到1.08 m，此值要大于实测值。这主要是实测值的初值测量较晚，实测值偏小。



注：D30大圆筒顶高程3.5 m，底高程-44.0 m，以向圆筒中心变形为正值，虚线为数值模拟结果。



注：D30大圆筒顶高程3.5 m，底高程-44.0 m，以向大圆筒圆心变形为正值，虚线为数值模拟结果。

图9 D30 实测结果与模拟结果对比

与位移相比，工况3钢圆筒和副格应力较小(图10)，钢圆筒和副格仓远没有达到破坏的强度。应指出本计算将钢圆筒与副格连接视为刚性连接，但实际情况钢圆筒与副格是通过榫槽连接的。因此，钢圆筒和副格之间具有一定的独立性，实际中副格与钢圆筒之间的接触应力要小于此值。

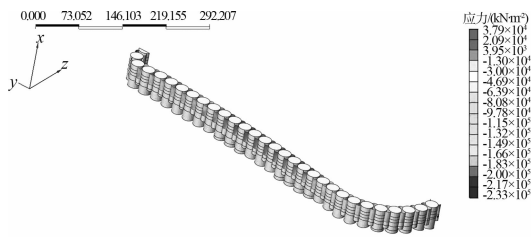


图10 工况3钢圆筒及副格仓应力云图

4 结论

1) 大直径钢圆筒在圆筒内部土体降水预压加固处理的过程中,其变形特性与重力式挡墙结构变化类似,但有所差别,因此有必要深入研究大直径钢圆筒的变形机理。

2) 大直径钢圆筒作为人工岛岛壁结构时,其与副格相互作用不可忽视,之间的相互作用机理仍需继续研究。这时仅考虑大直径钢圆筒刚度,并没有真实反应其结构的特点。

参考文献:

- [1] 列瓦切夫 C H. 薄壳在水工建筑物中应用[M]. 北京: 人民出版社, 1982.
- [2] 斯米尔诺夫 r H. 港口与港口建筑物[M]. 吴德镇, 译. 北京: 人民交通出版社, 1984.

- [3] 陈福全, 龚晓南, 竺存宏. 大直径圆筒码头结构土压力性状模型试验[J]. 岩土工程学报, 2002(1): 72-75.
- [4] 陈宝珠, 刘建起. 硬基上抛石基床承载力的试验研究与评述[J]. 港工技术, 1995(2): 48-55.
- [5] 刘建起, 陈宝珠, 李久旺. 埋入式大直径圆筒岸壁土压力试验与稳定性计算研究[J]. 水运工程, 1993(2): 1-7.
- [6] 秦崇仁, 韩涛, 李世森, 等. 砂质底床上沉入式大直径圆筒结构施工期稳定性的实验研究[J]. 中国港湾建设, 2001(3): 7-12.
- [7] 潘厚志, 孙克俐, 周锡初, 等. 大直径圆柱壳结构与土体相互作用的一种耦合数值模拟方法[J]. 中国港湾建设, 2000(1): 26-30.
- [8] 周锡初, 段旭东, 桑学珠, 等. 弹性空间结构系统的 BEM-FEM 耦合分析[J]. 天津大学学报, 1991(S2): 41-47.
- [9] 周锡初, 潘厚志. 基床系数法在深埋式大圆柱壳结构数值模拟中的应用与改进[J]. 水利学报, 2001(6): 62-66.
- [10] 潘厚志, 孙克俐, 周锡初, 等. 大直径圆柱壳结构与土体相互作用的一种耦合数值模拟方法[J]. 中国港湾建设, 2000(1): 26-30.
- [11] 孟庆文, 王元战. 大直径圆筒结构与土相互作用的接触面单元——弹性非线性单元耦合分析[J]. 中国港湾建设, 1999(2): 2-6.

(本文编辑 武亚庆)

· 消 息 ·

中国港湾签约智利圣安东尼奥码头扩建项目

当地时间2月23日,中国港湾与圣安东尼奥国际港口公司(STI)在智利瓦尔帕莱索签署了智利圣安东尼奥码头扩建项目主合同。

该项目合同额4403万美元,主要工程内容包括2#泊位430m钢板桩施工,3#泊位南侧130m码头扩建、码头前沿32万m³水上开挖和后方堆场施工等。

该码头为智利最大港口,项目建成后将大大提高货物吞吐量,促进智利的经济发展。同时,该项目的成功签署,也将进一步提升中国港湾在智利的品牌影响力,有利于其深入开拓智利市场。

(摘编自《中国交通建设网》)