



大直径钢圆筒结构稳定性离心模型试验研究

王雪奎^{1,2,3,4,5}, 胡建军¹, 程 明¹

(1. 中交天津港湾工程研究院有限公司, 天津 300222;
2. 港口岩土工程技术交通运输行业重点实验室, 天津 300222; 3. 天津市港口岩土工程技术重点实验室, 天津 300222;
4. 中交集团岩土工程重点实验室, 天津 300222; 5. 中交第一航务工程局有限公司, 天津 300461)

摘要: 大直径钢圆筒结构是近年来兴起的一种新型水工结构形式, 具有结构简单、施工速度快、结构受力条件好、造价低等优点, 能够适应水深浪大的恶劣环境, 在软土地区具有广阔的应用前景。在钢圆筒施工过程中, 其在风浪荷载下的稳定性是工程关注的主要问题。以东海某码头工程钢圆筒护岸为研究对象, 通过土工离心模型试验, 研究钢圆筒结构的破坏模式和稳定性, 并对位移、筒壁土压力、筒身应变等进行分析。结果表明: 软土地基上钢圆筒结构在水平荷载作用下的失稳破坏模式主要表现为倾斜失稳, 而不是整体平移; 钢圆筒失稳破坏时的极限荷载约为其所受水平荷载的 2 倍; 在水平荷载作用下, 陆侧筒壁土压力逐渐升高, 海侧筒壁土压力逐渐降低, 陆侧筒壁土压力明显大于海侧; 筒身应变随深度的增加而增大, 钢圆筒底部的筒身应力明显大于上部。

关键词: 钢圆筒结构; 软土地基; 稳定性; 离心模型试验

中图分类号: U656.3; TU432

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)04-0168-05

Centrifugal model test on stability of large diameter steel cylinder structure

WANG Xuekui^{1,2,3,4,5}, HU Jianjun¹, CHENG Ming¹

(1. CCCC Tianjin Port Engineering Institute Co., Ltd., Tianjin 300222, China;
2. Key Laboratory of Port Geotechnical Engineering, Ministry of Transport, PRC, Tianjin 300222, China;
3. Key Laboratory of Port Geotechnical Engineering of Tianjin, Tianjin 300222, China;
4. Key Laboratory of Geotechnical Engineering, CCCC, Tianjin 300222, China;
5. CCCC First Harbor Engineering Co., Ltd., Tianjin 300461, China)

Abstract: The large diameter steel cylinder structure is a new type of hydraulic structure that has emerged in recent years. It has advantages of simple structure, fast construction speed, good structural stress conditions, low cost, and can adapt to the hostile environment of deep water and large waves, which has broad application prospects in soft soil areas. During the construction of steel cylinder, its stability under wind and wave load is the main issue of engineering concern. Taking the steel cylinder revetment of a wharf project in the East China Sea as the research object, we study the failure mode and stability of the steel cylinder structure through the geotechnical centrifugal model test, and analyze the characteristics of displacement, the cylinder wall soil pressure, cylinder body strain and etc. The results show that the failure mode of steel cylinder structure on soft soil foundation under horizontal load is mainly inclined failure, not overall translation. The ultimate load of the steel cylinder is about 2 times of the horizontal load when it loses stability and fails. Under the action of horizontal load, the soil pressure of the cylinder wall on the land side gradually increases, and the soil pressure of the cylinder wall on the sea side gradually decreases, and the soil pressure of the cylinder wall on the land side is significantly greater than that on the sea side. The strain of the cylinder increases with the depth, and the stress of the cylinder at the bottom of the steel cylinder is significantly greater than that at the top.

Keywords: steel cylinder structure; soft soil foundation; stability; centrifugal model test

收稿日期: 2023-07-26

作者简介: 王雪奎 (1989—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事土工离心模型试验研究。

我国沿海地区分布大量的淤泥质海岸, 由于其软土层深厚、强度低、承载力差等特点, 在修筑码头工程时, 一般需要提前对软土地基进行处理。但是由于风浪等不利因素的影响, 地基处理的费用高、施工难度大, 迫切需要寻找一种能够适应天然软土地基的码头结构形式。大直径钢圆筒结构是近年来兴起的一种新型水工结构形式, 类似于无底、无隔墙的圆形沉箱结构, 能适应软土地基和水深浪大等恶劣工况, 具有广阔的应用前景^[1-3]。

根据前人的研究成果, 钢圆筒结构具有如下优点: 1) 钢圆筒结构质量轻, 对地基的要求低, 能够直接利用承载力低的软土地基^[4-5]; 2) 钢圆筒结构与地基的接触面积大, 能够将上部荷载传递到更大面积的地基土体中^[6-7]; 3) 钢圆筒结构打设到位后, 所有通气孔被封闭, 钢圆筒侧壁与地基土体发生相对位移时, 受真空吸力的影响, 将钢圆筒结构和地基土体牢牢固定而形成一个整体, 从而提高整个结构的稳定性^[8-9]。

从整体上看, 钢圆筒结构作为一种新型水工结构, 其设计计算方法仍落后于工程实践, 特别是钢圆筒结构的稳定机理和破坏模式仍需要深入研究。本文依托东海某码头工程, 通过土工离心模型试验, 对钢圆筒结构的稳定性进行研究, 并分析位移、筒壁土压力、筒身应变等参数的变化规律, 为工程的设计和施工提供参考。

1 工程概况

东海某码头工程护岸采用子堰式钢圆筒斜坡堤形式。工程地基存在深厚软土层, 主要可分为淤泥质黏土、粉质黏土、粉质黏土混砂等, 各土层的物理力学指标见表1。钢圆筒结构的直径22 m、高62 m、壁厚16 mm, 顶部高程为5 m, 底部穿透淤泥质黏土层和粉质黏土层, 以粉质黏土混砂层为持力层。施工阶段, 在风浪和水流等水平荷载作用下, 钢圆筒结构可能存在失稳破坏, 需要通

过离心模型试验验证其稳定性。

表1 地基土层的主要物理力学性质

土层 性质	土层 名称	厚度/ m	密度/ $t \cdot m^{-3}$	快剪		压缩模量 E_s/MPa
				内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$	黏聚力 c/kPa	
上部 土层	淤泥质黏土	29.5	1.69	4.0	10.0	2.1
土层	粉质黏土	20.1	1.77	11.5	13.8	3.2
持力层	粉质黏土混砂	10.0	1.97	10.7	36.7	6.9

2 试验方法

2.1 试验设备及设计

试验通过TPEI-200型土工离心机完成。该机最大离心加速度为200g, 最大负载为20 kN, 最大半径为4 m, 其主机如图1所示。



图1 TPEI-200型土工离心机

综合考虑模型尺寸、模型制作、传感器布置等因素, 选定模型的比尺为95, 相应的模型箱尺寸为1 200 mm×400 mm×800 mm(长×宽×高)。

2.2 模型制作

试验中关键的结构物为大直径钢圆筒, 其材质为普通钢材。在离心模型试验中, 结构物通常采用与原型相同的材质制作。因此, 钢圆筒模型仍采用与原型相似的不锈钢制作, 其弹性模量与钢材基本一致。按照几何相似关系, 经过计算, 模型钢圆筒的直径232 mm、高653 mm、壁厚0.17 mm。

模型地基土料取自工程现场, 对底部持力层以压缩模量为控制标准。模型制作时, 将粉质黏土和粗砂进行合理配比, 然后分层击实到所需高度, 制样干密度为1.65 t/cm³, 击实后模型土体的

压缩模量与原型基本相等。对上部淤泥质黏土和粉质黏土土层，以地基不排水强度指标作为控制标准。首先将土料进行风干、碾碎，过筛去除杂质后，充分浸泡饱和，然后搅拌成含水率约等于2倍液限的泥浆，最后灌入固结仪成层固结，这样自下而上制作模型各土层。固结期间，通过微型十字板测量各土层不排水强度，直至模型淤泥质黏土层的平均不排水强度达到10 kPa，粉质黏土层的平均不排水强度达到15 kPa。

钢圆筒结构在风浪荷载下可能产生失稳破坏，但在离心模型试验中直接模拟风浪荷载存在困难，故试验采用拟静力法模拟风浪荷载。根据JTS 145—2015《港口与航道水文规范》^[10]建议的风浪荷载近似计算方法，试验中的风浪荷载可简化为水平静力，其大小为6 789.6 kN，作用点位于-0.5 m高程处。为施加水平荷载，专门研制了水平加载装置，如图2所示。该加载装置采用伺服电机驱动，最大工作加速度为150g，最大荷载为5 kN，可采用应力或应变控制。试验中水平荷载采用应变控制模式，加载速率为1 mm/min。



图2 水平加载装置

2.3 模型测量布置

试验过程中，采用激光位移计对模型关键点的水平位移和沉降进行测量，采用微型土压力计对筒壁两侧的土压力进行测量，采用粘贴应变片的方法对筒身应变进行测量。钢圆筒模型的布置如图3所示。

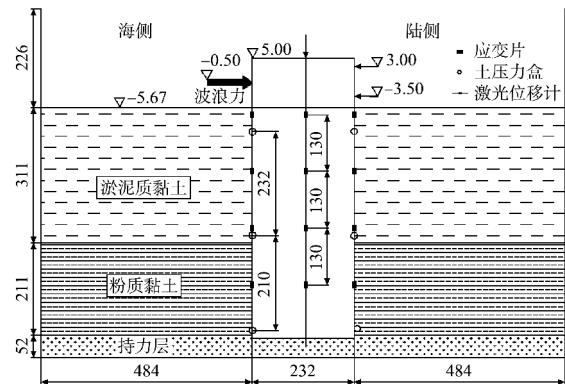
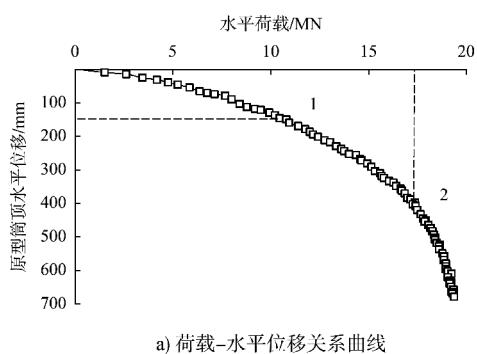


图3 模型布置(尺寸：mm；高程：m)

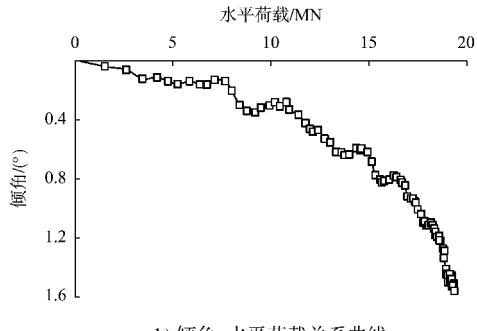
3 试验结果分析

3.1 稳定性分析

钢圆筒原型筒顶水平位移与水平荷载的关系曲线见图4a)。可以看出，钢圆筒筒顶水平位移随水平荷载的增加而增大，在开始阶段，筒顶水平位移增大的速率较为缓慢，当荷载超过17.39 MN后(点2)，筒顶水平位移急剧增大，可认为此时钢圆筒发生失稳破坏，破坏荷载为17.39 MN。钢圆筒失稳破坏荷载约为其所受波浪力(6.79 MN)的2倍，这说明该钢圆筒结构能够在波浪力作用下保持稳定。JTS 167-13—2019《插入式钢圆筒结构设计与施工规范》^[11]要求，在施工阶段，筒顶水平位移与泥面以上筒身高度之比不得大于1.5%。在本工程中，泥面以上筒身高度为10.67 m，则允许的筒顶水平位移最大为160 mm，此值对应的水平荷载为10.94 MN。该值约为其所受波浪力的1.6倍，所以从筒顶允许最大水平位移上看，钢圆筒结构是稳定的。钢圆筒原型筒身倾角与水平荷载的关系曲线见图4b)。可以看出，在水平荷载作用下，钢圆筒筒身逐渐向陆侧倾斜，倾角逐渐增大，在开始阶段增长缓慢，达到破坏荷载后，急剧增大。当筒顶水平位移达到规范值时，对应的水平荷载为10.94 MN时，筒身倾角为0.33°；当水平荷载达到破坏荷载(17.39 MN)时，筒身倾角为0.96°。



a) 荷载-水平位移关系曲线

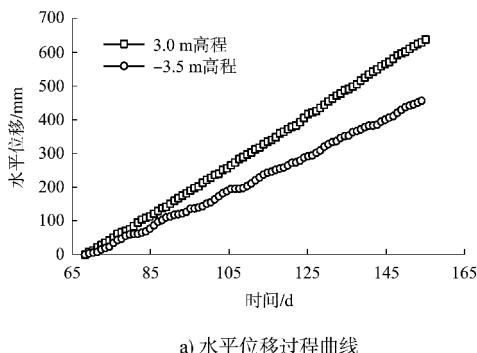


b) 倾角-水平荷载关系曲线

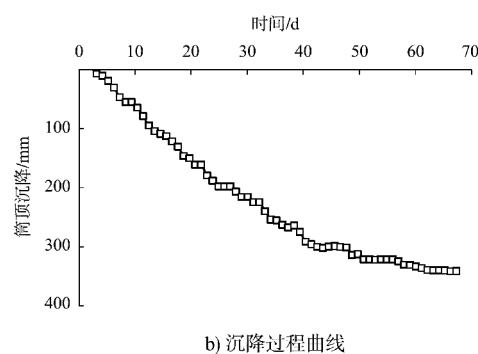
图4 钢圆筒原型水平荷载、倾角与水平位移关系曲线

3.2 位移分析

水平荷载作用下钢圆筒原型筒身不同高程处水平位移的过程曲线见图5a)。可以看出,在水平荷载作用下,各测点的水平位移都随时间线性增大,在开始阶段,3.0与-3.5 m高程处的水平位移差值不大,随后上部和下部测点的水平位移差值越来越大,这说明钢圆筒结构的破坏模式主要是倾斜失稳,而不是整体平移。当达到破坏荷载时,3.0、-3.5 m高程处的水平位移分别为382.8、273.8 mm。钢圆筒顶中心点砂面的沉降过程曲线见图5b)。可以看出,筒顶中心点的沉降随着时间的增加增大,开始阶段沉降速率较大,后逐渐趋于稳定。施工67 d后,筒顶中心点的沉降为341.5 mm。



a) 水平位移过程曲线



b) 沉降过程曲线

图5 钢圆筒原型筒身不同高程处水平位移与筒顶中心点砂面的沉降过程曲线

3.3 筒壁土压力分析

-11 m高程处钢圆筒原型筒壁土压力的过程曲线见图6。可以看出,筒壁土压力随离心加速度的升高而增大,待离心加速度达到95g,并保持稳定后,土压力也逐渐趋于稳定。该过程相当于恢复了钢圆筒地基的初始应力状态,此时-11 m高程处海侧、陆侧的筒壁土压力分别为103.8、104.9 kPa,基本保持一致。当施加水平荷载后,陆侧筒壁土压力逐渐增加,海侧筒壁土压力逐渐减小,这也说明陆侧土体受到挤压,钢圆筒逐渐向陆侧倾斜。钢圆筒结构失稳破坏时,-11 m高程处海侧、陆侧的筒壁土压力分别为82.2、124.7 kPa。

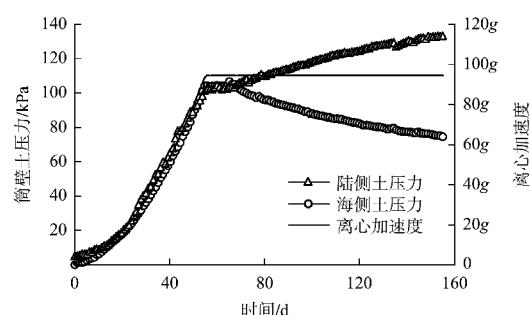


图6 钢圆筒原型-11 m高程处筒壁土压力过程曲线

3.4 筒身应变分析

陆侧不同高程处钢圆筒原型筒身应变的过程曲线见图7。可以看出,筒身应变随离心加速度的增加而增大,待离心加速度稳定后,也逐渐趋于稳定。钢圆筒结构失稳破坏时,陆侧-7、-19、-31 m高程处的筒身应变分别为 105.6×10^{-6} 、 485.1×10^{-6} 、 590.3×10^{-6} 。从筒身应变数值上看,

深度越大，筒身应变越大，这表明钢圆筒身应力随深度增加而增大。

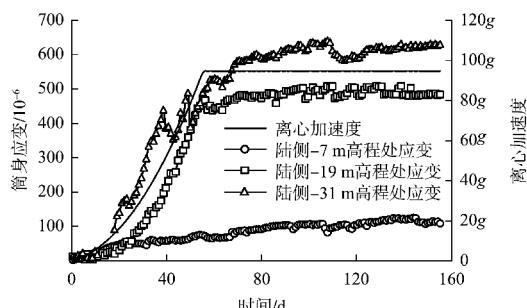


图 7 钢圆筒原型筒身应变过程曲线

4 结论

1) 钢圆筒顶水平位移随水平荷载的增加而增大，在开始阶段，增大的速率较为缓慢，当水平荷载超过某一值时，筒顶水平位移急剧增大，这说明钢圆筒结构产生失稳破坏。从荷载与水平位移关系上看，钢圆筒结构的破坏荷载约为其所受波浪力的2倍；从规范允许的筒顶水平位移最大值上看，钢圆筒结构的破坏荷载约为其所受波浪力的1.6倍，这说明钢圆筒结构能够在波浪荷载下保持稳定。

2) 在水平荷载作用下, 钢圆筒身上部和下部测点的水平位移差值随时间的增加而增大, 这说明钢圆筒结构逐渐倾斜, 其破坏模式主要表现为倾斜失稳, 而不是整体平移。

3) 在水平荷载作用下, 陆侧筒壁土压力逐渐增加, 海侧筒壁土压力逐渐减小, 这也说明陆侧土体受到挤压。钢圆筒逐渐向陆侧倾斜。

4) 从筒身应变数值上看, 深度越大, 筒身应变越大, 这表明钢圆筒身应力随深度增加而增大。

参考文献：

- [1] 刘健,夏丰勇,唐一夫.深中通道西人工岛总体设计及大直径钢圆筒快速成岛技术[J].水运工程,2021(6): 13-19.
 - [2] 唐云,李洋,樊亮亮.香港机场第三跑道填海工程插入式钢圆筒结构设计[J].水运工程,2020(9): 180-185.
 - [3] 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.
 - [4] 范庆来,栾茂田,杨庆.软基上沉入式大圆筒结构的水平承载力分析[J].岩土力学,2004, 25(S2): 191-195.
 - [5] 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.
 - [6] 刘建起,杨亮,夏晓迪.沉入式无底圆筒结构基底压力试验研究 [J].港工技术,2008(2): 41-44.
 - [7] 曹永勇,张海文,丁大志,等.新型桶式基础防波堤在负压下沉中的结构内力观测及分析[J].中国港湾建设,2014(4): 26-29, 45.
 - [8] 曹永勇,蔡正银,关云飞,等.新型桶式基础防波堤在负压下沉中的稳定性试验[J].水运工程,2014(7): 41-45.
 - [9] 徐光明,顾行文,任国峰,等.防波堤驳岸椭圆形桶式基础结构的贯入受力特性实验研究[J].海洋工程,2014, 32(1): 1-7, 16.
 - [10] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司.港口与航道水文规范: JTS 145—2015[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2015.
 - [11] 中交第四航务工程勘察设计院有限公司,中交一航局第一工程有限公司.插入式钢圆筒结构设计与施工规范: JTS 167-13—2019[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2019.

(本文编辑 王璁)

· 消 夏 ·

天津恒阳化工码头交工验收

近日，由中交一航局承建的天津恒阳化工码头项目通过交工验收。

该项目位于天津港大港区，建设内容包括 151 t 工艺管道及附属工程，将码头承载力由原 2 万吨级提升到 5 万吨级，可停靠两艘 5 万吨级油船。

该项目投用后，将进一步提升恒阳化工码头接卸效率，成为华北地区化工物流枢纽之一，为油气产业链建设和服务国家能源安全作出贡献。