



插入比对钢圆筒结构稳定性影响的 离心模型试验研究

王雪奎^{1,2,3,4,5}, 曹晓航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: 钢圆筒结构避免了地基开挖, 且无需抛石, 可快速成岛, 与传统的水工结构相比, 优势明显, 具有广阔的应用前景。随着工程向远海的推进, 插入比已成为影响钢圆筒结构稳定性的重要因素, 现有的规范和计算方法逐渐不能满足工程的需要, 因此亟需对该问题进行深入研究。通过离心模型试验, 对插入比对钢圆筒结构稳定性影响进行研究。结果表明: 筒顶水平位移随波浪荷载的增加而增大, 初始阶段近似呈线性增大关系, 达到极限荷载后, 筒顶水平位移急剧增大, 曲线表现为陡降型; 钢圆筒失稳破坏主要表现为倾覆破坏, 破坏时海侧泥面出现环状裂纹, 陆侧泥面出现放射状裂纹; 钢圆筒极限荷载和筒顶水平位移与泥面以上筒身高度之比 $S/H=1.5\%$ 时荷载都随着插入比的增加而增大, 近似呈线性关系; 钢圆筒极限荷载与插入比关系可近似表示为 $y=19\,427x+6\,268.3$, $S/H=1.5\%$ 时荷载与插入比关系可近似表示为 $y=2\,072.6x+6\,100.7$ 。

关键词: 钢圆筒; 插入比; 稳定性; 离心模型试验

中图分类号: U655.54; TU432

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)11-0007-06

Centrifuge model test on influence of insertion ratio on stability of steel cylinder structure

WANG Xuekui^{1,2,3,4,5}, CAO Xiaohang¹

(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 steel cylinder structure avoids foundation excavation and does not require stone throwing, allowing for rapid island formation. Compared with traditional hydraulic structures, it has obvious advantages and broad application prospects. With the advancement of engineering towards the open sea, the insertion ratio has become an important factor affecting the stability of steel cylinder structures. The existing specifications and calculation methods gradually do not meet the needs of engineering, so it is urgent to conduct in-depth research on this issue. We study the influence of insertion ratio on the stability of steel cylinder structures through centrifugal model test. The results show that the horizontal displacement of the cylinder top increases with the increase of wave load. In the initial stage, it approximately increases linearly, and after reaching the ultimate load, the horizontal displacement of the cylinder top increases sharply, and the curve shows a steep decrease. The instability and failure of steel cylinders are mainly manifested as overturning failure, during the failure, circular cracks appear on the mud surface on the sea side and radial cracks appear on the mud surface on the land side. Both the ultimate load of the steel cylinder and the load when the ratio of the horizontal displacement at the top of the cylinder to the height of the cylinder body above the mud surface S/H is 1.5% increase with the increase of the insertion ratio, showing an

收稿日期: 2025-03-04

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工作。

approximately linear relationship. The relationship between the ultimate load and insertion ratio of a steel cylinder can be approximately expressed as $y = 19\,427x + 6\,268.3$, and when S/H is 1.5%, the relationship between the load and insertion ratio can be approximately expressed as $y = 2\,072.6x + 6\,100.7$.

Keywords: steel cylinder structure; insertion ratio; stability; centrifugal model test

近年来,插入式钢圆筒作为岛壁结构大量应用于港珠澳大桥、深中通道等重大工程的人工岛建设中。由于该结构避免了地基开挖,且无需抛石,可快速成岛,与传统的水工结构相比,具有突出的优势,应用前景广阔^[1-3]。

根据前人的研究,插入式钢圆筒结构类似于无底、无隔墙的圆形沉箱结构^[4-5],对地基的要求低,能够适应承载力低的软土地基,打设后与地基土体固定成一体,可将上部荷载传递到更大面积的地基土体中,且由于筒壁摩擦力的影响^[6-8],提高了整体的稳定性。但随着工程向远海的推进,钢圆筒结构已由原来的浅插结构发展为入土深度超过 30 m 的深插结构,插入比(入土筒体深度与土面以上筒体高度之比)已经成为影响结构稳定性的重要因素,现有的规范和计算方法逐渐不能满足工程的需要,因此亟需对该问题进行深入研究。

本文通过离心模型试验,对插入比对钢圆筒结构稳定性影响进行研究,明确插入比对钢圆筒稳定性的贡献,并对钢圆筒破坏时关键部位的内力、变形、土压力进行测量,探究筒体两侧筒体所受土压力的分析方法,为相关工程的设计和施工提供参考。

1 试验工况

本文试验模拟的钢圆筒直径为 30 m、高度为 30 m、筒壁厚度为 16 mm。地基土体为淤泥质黏土,其主要物理力学指标见表 1。试验共分为 3 种工况,插入比分别取 1:1、1:3、1:5,即入土深度分别为 15、7.5、5 m。钢圆筒所受波浪流荷载可简化为集中力,集中力大小取 5 000 kN,作用点为泥面以上 7.5 m,海床泥面高程为 0 m。

表 1 地基土层的主要物理力学指标

Tab. 1 Main physical and mechanical indicators of foundation soil

厚度/ m	含水率/ %	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	快剪		压缩模量 E_s/MPa
			内摩擦角 $\varphi/(\circ)$	黏聚力 c/kPa	
60	42.1	1 650	8	2	2.3

2 试验原理和设备

2.1 离心模型试验原理

在岩土工程中,岩土体的工程性质主要受自重应力影响,由于岩土体天然的复杂性和非线性,土的力学特性又随应力水平高低不同而表现不同,然而在地面上 $1g$ (g 为重力加速度,等于 9.8 m/s^2) 条件下进行常规小比尺的物理模型试验,假设模型几何比尺为 N ,土体和其中的结构物中的自重应力水平为原型的 $1/N$,远低于原型实际工程中的自重应力水平。因此,模型的性状就不能很好地反映原型的性状。土工离心模型试验是将缩尺的模型置于高速旋转的离心机中,通过离心惯性系补偿模型因缩尺带来的自身重力损失,这样,模型土体和其中的结构物中的应力水平与原型一致,从而在模型中再现原型的性状。换言之,土工离心模型试验原理的核心就是借助离心机为缩尺模型创造一个与原型应力水平相同的应力场^[9-10]。离心模型试验原理见图 1。

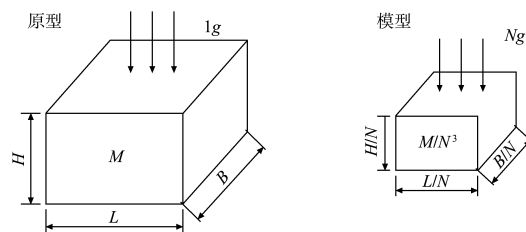


图 1 离心模型试验原理

Fig. 1 Test principle of centrifugal model test

假设工程原型尺寸为 $L \times B \times H$ (长×宽×高),则原型的应力、应变为:

$$\sigma_{\text{原型}} = \frac{Mg}{LB} \quad (1)$$

$$\varepsilon_{\text{原型}} = \frac{\delta L}{L} = \delta \quad (2)$$

式中: $\sigma_{\text{原型}}$ 为原型应力; M 为质量; g 为重力加速

度; $\varepsilon_{\text{原型}}$ 为原型应变; δ 为长度变化率; L 为长度; B 为宽度; H 为高度。

土工离心模型试验采用 $1/N$ 原型的模型, 在 Ng 的离心加速度环境下进行试验, 此时产生的离心力场与重力场在一定条件下基本相等, 且通常离心加速度对材料性质的影响很小, 故对应的模型应力、应变为:

$$\sigma_{\text{模型}} = \frac{M/N^3 \cdot Ng}{L/N \cdot B/N} = \frac{Mg}{LB} \quad (3)$$

$$\varepsilon_{\text{模型}} = \frac{\delta L/N}{L/N} = \delta \quad (4)$$

式中: $\sigma_{\text{模型}}$ 为模型应力; $\varepsilon_{\text{模型}}$ 为模型应变。由此可知, 离心模型与原型的应变、应力相等, 变形相似, 破坏机理也相同, 能够较好地再现原型的特征。

2.2 试验设备

本文试验在中交天津港湾工程研究院有限公司 TPEI-200 土工离心机上完成的, 见图 2。该机是岩土工程领域的高水平研究平台。该离心机采用双吊篮对称臂设计, 最大容量为 $200g \cdot t$, 最大半径为 4 m, 最大离心加速度为 $200g$, 最大负载为 20 kN, 最大可稳定运行 48 h。同时, 该机配备了目前国内最先进、最齐全的机载设备, 可在超重力场下真实模拟插拔桩、挖坑、打洞、削坡、振动、抛填、水位升降等多种工况。



图 2 TPEI-200 型土工离心机

Fig. 2 TPEI-200 geotechnical centrifuge

3 试验方法

3.1 模型比尺

根据钢圆筒结构的几何尺寸, 并结合模型布置、模型制作、模型测量等因素, 选定模型几何比尺 $N=120$ 。以质量、长度、时间作为基本物理量, 则模型与原型主要物理量之间的关系见表 2。

表 2 离心模型试验主要相似比尺

Tab. 2 Main similar scales of centrifugal model test

分项内容	物理量	量纲	相似比尺
几何尺寸	长度	L	N
材料性质	密度	ML^{-3}	1
	黏聚力	$ML^{-1}T^{-2}$	1
	内摩擦角	1	1
	集中力	MLT^{-2}	N^2
性状反应	应力	$ML^{-1}T^{-2}$	1
	应变	1	1
	位移	L	N

3.2 模型制作

本文试验模拟的地基土层为深厚淤泥层, 对稳定性模型试验, 地基土层的抗剪强度是关键性控制指标, 故模型制备时, 必须严格控制地基土层的强度。试验土料取自天津地区的黏土, 为模拟成层地基, 首先将土料进行风干、碾碎、过筛, 然后经过浸泡, 制成泥浆, 缓慢注入模型箱内, 然后将模型箱安装到固结仪上, 逐级加载固结, 直至其不排水强度满足设计要求, 这样从下向上依次制备模型地基。淤泥土层制备完成后, 用微型十字板进行强度测试, 平均不排水抗剪强度约为 8.5 kPa。

离心模型试验中的结构物通常应选用与原型相同的材料制作。因此, 本文离心模型试验中的钢圆筒仍采用与原型相同材质的不锈钢制作, 其弹性模量与钢材接近。钢圆筒直径 30 m、高度 30 m、壁厚 16 mm, 经过换算, 相应的模型圆筒结构直径为 250 mm、高度为 250 mm、壁厚为 0.15 mm。

3.3 波流荷载模拟

钢圆筒结构在波浪流荷载下可能产生失稳破坏, 但在离心模型试验中直接模拟波浪流荷载存在困难, 故本文试验采用拟静力法模拟波浪流荷

载,即将波浪力转化为一个水平荷载。为此,专门研制了水平加载装置,见图3。该装置能够在最大150g条件下工作,最大推力5kN,其同时配备了应变、应力及低频循环三种加载控制方式,加载速率可调,试验过程中通过上位机中的专用操作软件发出指令控制下位机,并实时监测荷载与水平位移之间的变化关系,施加荷载数据通过安装在作用点前端的力传感器获得。本文试验采用应变加载方式,加载速率为1mm/s。

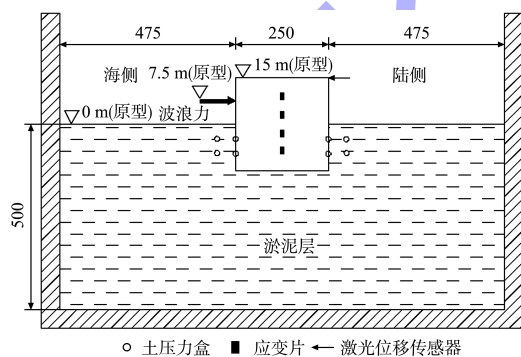


图3 水平加载装置

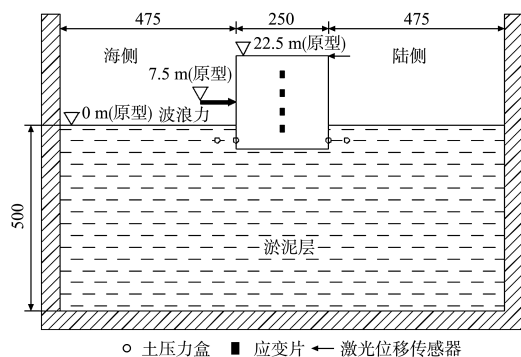
Fig. 3 Horizontal loading device

3.4 传感器布置

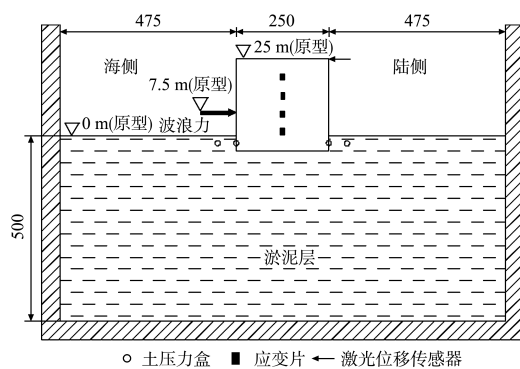
3种试验工况的模型布置见图4。



a) 工况1(插入比1:1)



b) 工况2(插入比1:3)



c) 工况3(插入比1:5)

图4 3种工况的模型布置 (单位: mm)

Fig. 4 Model layouts for three conditions (unit: mm)

4 试验结果分析

4.1 稳定性分析

工况1钢圆筒所受波浪荷载与筒顶水平位移关系曲线见图5。可以看出,筒顶水平位移随波浪荷载的增加而增大,初始阶段,近似呈线性增大关系;达到极限荷载后(图中点2),筒顶水平位移急剧增大,曲线表现为陡降型,一般认为此时钢圆筒发生失稳破坏,极限荷载为25 413.2 kN。

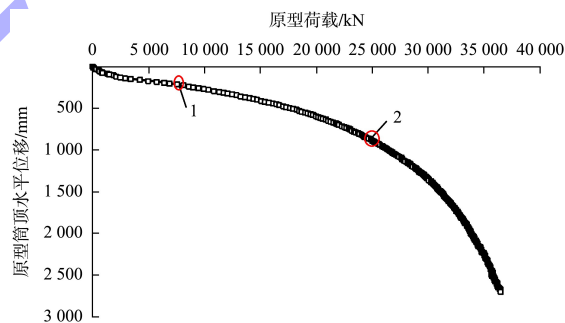


图5 工况1水平荷载与水平位移关系曲线

Fig. 5 Relationship curve between horizontal load and horizontal displacement in condition 1

根据JTS 167-13—2019《插入式钢圆筒结构设计及施工规范》^[11],钢圆筒筒顶水平位移 S 与泥面以上筒身高度 H 之比应小于1.5%。工况1泥面以上筒身高度为15m,则对应筒顶水平位移为225mm,此时对应波浪荷载为8 118.7 kN。

工况2和3钢圆筒所受波浪荷载与筒顶水平位移关系曲线见图6。根据上文的分析方法,工况2钢圆筒的极限荷载为14 434.9 kN,工况3钢圆筒的极限荷载为8 743.9 kN。

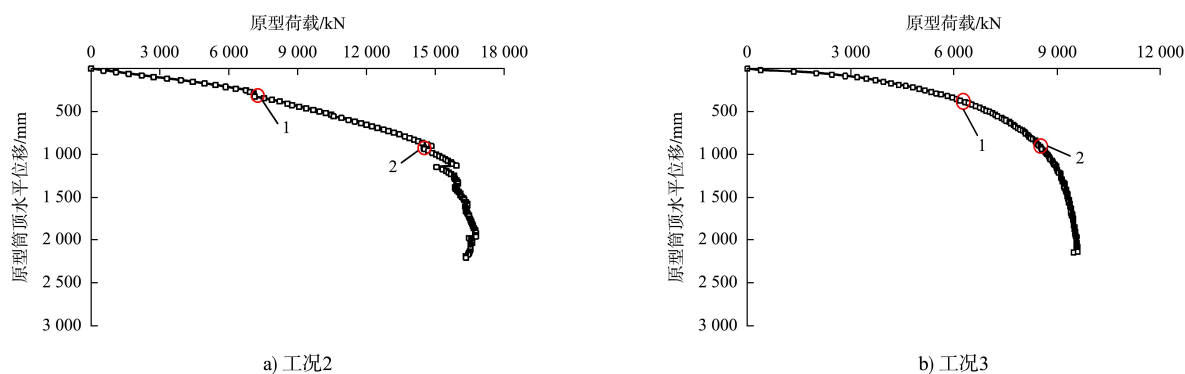


图 6 工况 2 和 3 水平荷载与水平位移关系曲线

Fig. 6 Relationship curves between horizontal load and horizontal displacement in condition 2 and condition 3

4.2 失稳破坏现象

钢圆筒失稳破坏时的现象见图 7。可以看出,

钢圆筒破坏主要表现为倾覆破坏, 破坏时海侧泥面出现环状裂纹, 陆侧泥面出现放射状裂纹。



图 7 钢圆筒失稳破坏时的现象

Fig. 7 Phenomenon of instability and failure of steel cylinder

4.3 插入比影响分析

钢圆筒极限荷载和 $S/H = 1.5\%$ 时, 荷载与插入比关系曲线见图 8。可以看出, 钢圆筒极限荷载和 $S/H = 1.5\%$ 时荷载都随着插入比的增加而增大, 近似呈线性关系。

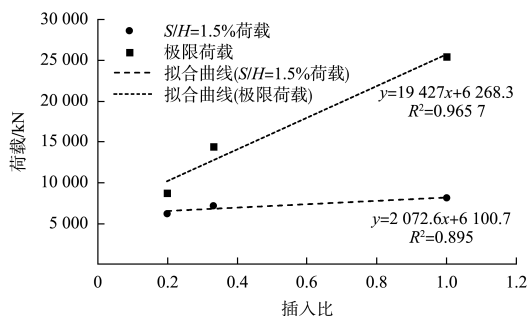


图 8 荷载与插入比关系曲线

Fig. 8 Relationship curve between load and insertion ratio

进一步将数据通过最小二乘法进行回归分析, 钢圆筒极限荷载与插入比关系可近似表示为 $y = 19\,427x + 6\,268.3$, $S/H = 1.5\%$ 时荷载与插入比关系可近似表示为 $y = 2\,072.6x + 6\,100.7$ 。

5 结论

- 1) 筒顶水平位移随波浪荷载的增加而增大, 初始阶段, 近似呈线性增大关系; 达到极限荷载后, 筒顶水平位移急剧增大, 曲线表现为陡降型。
- 2) 钢圆筒失稳破坏主要表现为倾覆破坏, 破坏时, 海侧泥面出现环状裂纹, 陆侧泥面出现放射状裂纹。

3) 钢圆筒极限荷载和 $S/H = 1.5\%$ 时荷载都随着插入比的增加而增大, 近似呈线性关系;

通过最小二乘法进行回归分析, 钢圆筒极限荷载与插入比关系可近似表示为 $y = 19\,427x + 6\,268.3$, $S/H = 1.5\%$ 时荷载与插入比关系可近似表示为 $y = 2\,072.6x + 6\,100.7$ 。

参考文献:

- [1] 范庆来, 栾茂田, 杨庆. 软基上沉入式钢圆筒结构的水平承载力分析[J]. 岩土力学, 2004, 25(S2): 191-195.
FAN Q L, LUAN M T, YANG Q. Numerical analysis of lateral load bearing capacity of large cylindrical structures on soft foundations[J]. Rock and soil mechanics, 2004, 25(S2): 191-195.
- [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.
TANG Y, LI Y, FAN L L. Design of inserted steel cylinder structure for Hong Kong airport third runway reclamation project [J]. Port & waterway engineering, 2020(9): 180-185.
- [3] 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.
LIU J, XIA F Y, TANG Y F. Overall design of western artificial island of Shenzhen - Zhongshan link and rapid island-formation technology by large-diameter steel cylinder [J]. Port & waterway engineering, 2021(6): 13-19.
- [4] 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 W, CHEN S, CHENG Z K, et al. Stability study of bucket-based structure on horizontal loading [J]. China harbour engineering, 2012(5): 14-18.
- [5] 刘健起, 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.
LIU J Q, YANG L, XIA X D. Experimental study on base stress of the opened bottom cylinder structures [J]. Port engineering technology, 2008(2): 41-44.
- [6] 徐光明, 章为民, 赖忠中. 沉入式大圆筒结构码头工作机理离心模型试验研究[J]. 海洋工程, 2001(1): 38-44.
XU G M, ZHANG W M, LAI Z Z. Centrifuge modeling of quay walls composed of large-diameter cylinders embedded below mud line [J]. The ocean engineering, 2001(1): 38-44.
- [7] 宋波, 冯国俊, 王荣. 基于标准化水平残余位移的沉入式钢圆筒防波堤抗震性能研究[J]. 工程力学, 2018, 35(10): 183-192.
SONG B, FENG G J, WANG R. Study on the aseismic performance of embedded steel cylinder breakwater for backfill sand foundation based on normalized residual horizontal displacement [J]. Engineering mechanics, 2018, 35(10): 183-192.
- [8] 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.
XU G M, GU X W, REN G F, et al. Penetration resistance and wall friction of ellipse lower bucket of breakwater into soft ground in centrifuge [J]. The ocean engineering, 2014, 32(1): 1-7, 16.
- [9] KOBAYASHI M, MIURA K, KONAMI T. Centrifugal model loading tests on reinforced soil retaining wall with groundwater permeation [C]//HAZARIKA H, KAZAMA M, LEE W F. Geotechnical Hazards from Large Earthquakes and Heavy Rainfalls. Berlin: Springer, 2017: 569-583.
- [10] 包承纲, 饶锡保. 土工离心模型试验的基本原理[J]. 长江科学院院报, 1998, 15(2): 1-7.
BAO C G, RAO X B. Basic principles of geotechnical centrifugal model test [J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 1998, 15(2): 1-7.
- [11] 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.
Design and construction code of embedded steel plate cylinder structure: JTS 167-13-2019 [S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2019.

(本文编辑 王璁)