

## 堆载作用下装配式钢圆筒稳定及变形分析\*

刘 阳, 肖 熠

(中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 上海 200032)

**摘要:** 针对深厚软土地基及堆载作用的复杂条件, 采用装配式钢圆筒护岸结构, 开展结构稳定及变形分析。首先确定合理的结构方案, 并通过条分法分析护岸整体稳定性, 其次采用数值模拟法分析钢圆筒在堆载作用下的变形特性, 最后通过离心模型试验验证装配式钢圆筒护岸的可靠性。结果表明: 在深厚软土地基条件下, 利用深插式钢圆筒截断堆载作用下的深层滑动面, 保障护岸的整体稳定; 当堆载作用距离护岸轴线 120 m 时, 钢圆筒顶部位移约 10 cm, 筒体向海侧倾斜 0.09°。通过堆载距离的控制, 其作用下钢圆筒变形对重要建筑物结构影响较小, 为钢圆筒护岸建设提供理论支撑。

**关键词:** 堆载作用; 装配式; 钢圆筒; 离心模型试验

中图分类号: U 656.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)05-0106-05

### Stability and deformation of prefabricated steel cylinder under loading effects

LIU Yang, XIAO Yi

(CCCC Third Harbor Consultants Co., Ltd., Shanghai 200032, China)

**Abstract:** In view of the complex conditions of deep soft soil foundation and loading effect, this paper analyzes the stability and deformation of a prefabricated steel cylinder revetment structure. Firstly, the paper determines a reasonable structural scheme and analyzes the overall stability of the revetment through the slice method. Secondly, the paper adopts a numerical simulation method to study the deformation characteristics of the steel cylinder under loading effects. Finally, the paper verifies the reliability of the prefabricated steel cylinder revetment by a centrifuge model test. The results show that under the condition of a deep soft soil foundation, the deep sliding surface under loading effects can be truncated by a deeply inserted steel cylinder to ensure the overall stability of the revetment. The top displacement of the steel cylinder is about 10 cm, and the cylinder tilts to the seaside by 0.09° when the loading effect is 120 m away from the revetment axis. By controlling loading distance, the deformation of the steel cylinder under loading effects has a slight influence on the structure of important buildings, which provides theoretical support for constructing steel cylinder revetments.

**Keywords:** loading effects; prefabricated structure; steel cylinder; centrifuge model test

外海岛礁风浪大、地基软土深厚, 传统护岸多采用斜坡式结构以适应地基变形, 包括爆破挤淤法<sup>[1]</sup>、塑料排水板法<sup>[2]</sup>、复合地基法<sup>[3]</sup>, 但地基加固深度受施工设备的影响均有一定的局限性。当软土厚度大于 40 m, 后方堆载作用大时, 地基加固深度对护岸整体稳定具有至关重要的作用。

装配式钢圆筒为空间薄壁结构, 通过振沉工艺将钢圆筒下沉至软土底部, 对护岸整体的稳定起抗滑作用。装配式钢圆筒工厂化预制, 焊接成形, 选用 1 600~4 000 t 及以上起重船施工, 具有抗风浪能力强、施工工期短、环境污染小及施工质量可靠的优势<sup>[4]</sup>。

收稿日期: 2022-11-15

\*基金项目: 国家重点研发计划项目 (2021YFB2600700)

作者简介: 刘阳 (1985—), 女, 博士, 高级工程师, 从事港口工程设计工作。

本文依托某散货堆场工程,针对软土深厚及堆场堆载作用大的建设条件,护岸采用装配式钢圆筒结构。首先分析钢圆筒在整体稳定性中发挥的作用;其次通过数值模拟法进行堆载作用下钢圆筒的变形分析;最后通过离心模型试验对钢圆筒的变形特征进行验证,确定方案的合理性,为工程设计提供理论依据。

## 1 装配式钢圆筒护岸

某港区通过围填海提供建设用地,护岸建设范围天然泥面高程 $-6.0\sim-5.0\text{ m}$ (理论基面)。地基表层淤泥层厚 $3\text{ m}$ ,其下淤泥质粉质黏土层累计厚 $27\text{ m}$ ,具有压缩性高、含水率高、强度低的特点,工程性质差;其下粉质黏土层厚 $20\text{ m}$ ,强度较低,工程性质一般;上述土层均为护岸建设的不良地基

土层,层底高程-55.3 m,累计厚度约为50 m。

装配式钢圆筒护岸由钢圆筒结构及抛石堤身组成,见图1。钢圆筒直径22 m,壁厚16 mm,顶高程5.0 m,底高程-57.0 m;钢圆筒之间采用弧形副格板连接,副格板半径6.0 m。筒内回填砂,地基处理采用塑料排水板降水预压法,塑料排水板间距1 m,正方形布置,底高程-31.0 m。筒外地基处理采用沉管碎石桩,直径1.0 m,置换率20%,碎石桩底高程-35.0 m。钢圆筒海侧及上部回填10~100 kg开山石,与钢圆筒间采用二片石、复合土工布和碎石垫层作为倒滤层。顶部设钢筋混凝土挡浪墙,顶高程10.0 m,堤顶道路高程8.5 m,宽8 m。临海侧边坡比为1:2,护面采用6 t扭王字块,下方设置300~600 kg块石垫层,镇压棱体采用800~1 500 kg大块石。

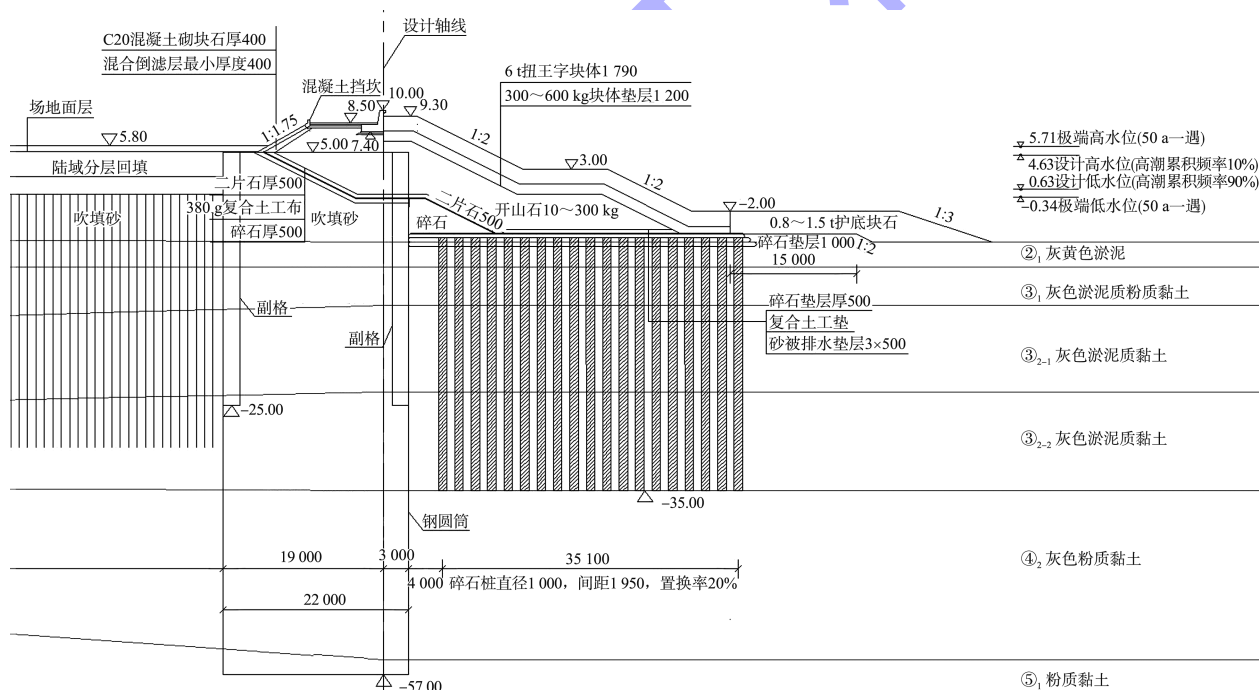


图 1 装配式钢圆筒护岸典型断面 (高程: m; 尺寸: mm)

## 2 堆载作用下护岸稳定性分析

对于堆载作用下护岸的整体稳定性,在施工期及投产初期利用钢圆筒的抗滑作用,通过深插式钢圆筒截断堆载作用下的深层滑动面;在使用期利用排水板及碎石桩的排水作用,通过提高土体强度和复合地基止滑。

### 2.1 钢圆筒的耐久性

根据 JTS 153—2015《水运工程结构耐久性设计标准》<sup>[5]</sup>，在海水环境的泥下区，装配式钢圆筒的钢结构单面平均腐蚀速度为 0.05 mm/a；在海水环境的水位变动区，钢结构单面平均腐蚀速度为 0.12 mm/a。护岸在 50 a 设计使用年限内，泥下区

钢圆筒内外侧的平均腐蚀厚度均为 2.5 mm，钢圆筒原始壁厚 16.0 mm，腐蚀后钢圆筒壁厚 11.0 mm；水位变动区钢圆筒内外侧的平均腐蚀厚度均为 6.0 mm，钢圆筒原始壁厚为 16.0 mm，腐蚀后钢圆筒壁厚为 4.0 mm。

设计使用年限内泥下钢圆筒厚 11.0 mm，仍可考虑其抗剪切作用。堆场通过使用期分级加载方式可在 10 a 内使地基软土达到基本固结，届时

泥面以下的钢圆筒即使按极端情况完全腐蚀，围堤整体稳定仍可满足要求，因此无需对泥下区钢圆筒进行特殊防腐。

设计使用年限内水位变动区钢圆筒基本腐蚀，可通过倒滤结构防止圆筒内及陆域吹填砂的渗漏。

2.2 护岸稳定计算参数

护岸整体稳定性采用 Slide（边坡稳定性）软件进行分析，计算参数见表 1。

表 1 天然地基土物理性质指标

土层	密度 $\rho/(\text{t} \cdot \text{m}^{-3})$	十字板强度 $c_u/\text{kPa}$	直剪快剪 $c/\text{kPa}$	直剪快剪 $\varphi/(\circ)$	固结快剪 $c'/\text{kPa}$	固结快剪 $\varphi'/(\circ)$
② <sub>1</sub> 淤泥	1.61	5.6	5.5	2.0	10.0	12.4
③ <sub>1</sub> 淤泥质粉质黏土	1.69	12.1	8.8	3.7	10.6	17.2
③ <sub>2,1</sub> 淤泥质黏土	1.66	21.1	8.9	3.7	10.8	13.6
③ <sub>2,2</sub> 淤泥质黏土	1.67	29.3	12.5	5.0	12.3	14.3
④ <sub>2</sub> 粉质黏土	1.77	42.9	13.8	11.5	12.7	20.4
⑤ <sub>1</sub> 粉质黏土	1.97	—	36.7	10.7	35.4	16.0
⑤ <sub>3</sub> 粉砂	2.00	—	8.5	33.0	7.8	34.6
堤心石	1.80	—	0.0	45.0	—	—
吹填砂	1.80	—	0.0	25.0	—	—
场地回填石	1.80	—	0.0	40.0	—	—
矿石	2.50	—	0.0	40.0	—	—

2.3 护岸稳定性分析

2.3.1 投产初期护岸整体稳定

投产初期陆侧水位通过降水措施已下降至 -3.0 m，海侧水位取设计低水位 0.63 m。陆域回填至 5.8 m，距离堤轴线 0~120 m 范围荷载 10 kPa，距离堤轴线 120 m 以上荷载 300 kPa。软土采用原位十字板抗剪强度指标，并考虑施工期附加应力引起的强度增长。虽然软土尚未完全固结，但利用钢圆筒的抗滑作用，护岸稳定性抗力分项系数可满足  $\geq 1.2$  的要求，见图 2。

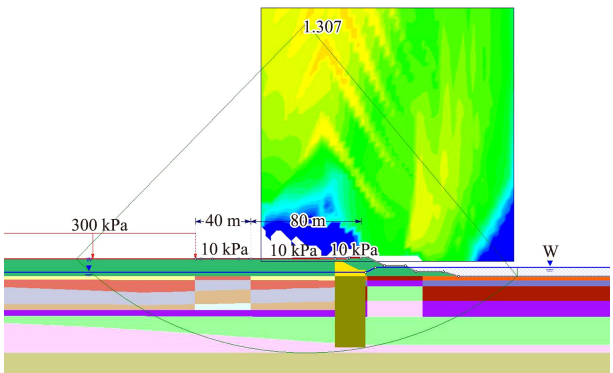


图 2 投产初期装配式钢圆筒护岸整体稳定性分析

2.3.2 使用期护岸整体稳定

使用期陆侧水位场地设计高程以下 1 m，即 4.8 m，海侧水位取极端低水位 -0.34 m。陆域高程 5.8 m，距离堤轴线 0~120 m 范围荷载 10 kPa，距离堤轴线 120 m 以上荷载 300 kPa。陆侧地基处理范围各主要土层抗剪强度采用固结快剪指标，海侧未地基处理范围各土层采用直剪快剪指标。软土已完全固结，即使不考虑钢圆筒的抗滑作用，护岸稳定性抗力分项系数也可满足  $\geq 1.3$  的要求，见图 3。

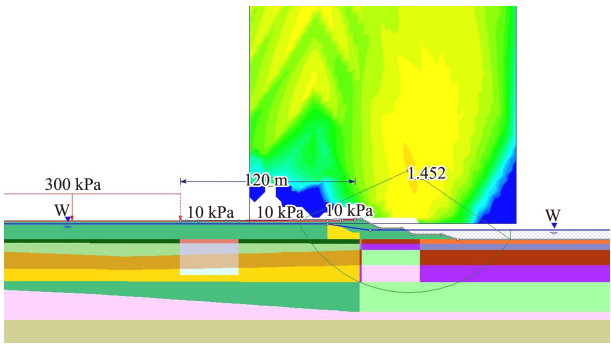


图 3 使用期装配式钢圆筒护岸整体稳定性分析

3 堆载作用下钢圆筒变形分析

3.1 计算模型及参数

堆载作用下钢圆筒变形采用 PLAXIS 3D(有限元软件)进行分析, 计算模型见图 4, 计算参数见表 2。

矿堆荷载距离护岸轴线 120 m, 钢圆筒高度 62 m, 钢圆筒及地基处理完成后, 陆域分级回填至设计高程 5.8 m, 推算土体固结至 80%。矿堆按 6、4、2 m 分三级加载至 12 m 堆高, 每级加高保证

前一级加固深度内固结度达到 80%, 未处理到的软土层固结度 20%。

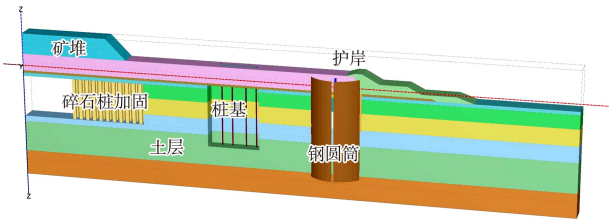


图 4 钢圆筒变形计算模型

表 2 地基土体模型参数

φ 模型	土层	黏聚力 c/kPa	摩擦角 φ/(°)	$E_{50}$ /MPa	$E_{oed}$ /MPa	$E_{ur}$ /MPa	m	排水类型
H-S 硬化模型	淤泥	8.0	12.0	2.3	2.1	14.7	0.9	不排水
	淤泥质粉质黏土	6.0	28.1	2.5	2.2	15.4	0.8	
	淤泥质粉质黏土	6.4	27.3	2.3	2.1	14.7	0.8	
	淤泥质粉质黏土	9.0	26.6	2.7	2.5	17.5	0.8	
	粉质黏土	7.0	31.0	3.3	3.0	21.0	0.7	
	粉质黏土	24.8	25.2	6.2	6.1	36.6	0.7	
ν 模型	材料	黏聚力 c/kPa	摩擦角 φ/(°)	E/MPa	ν	ρ/(t·m <sup>-3</sup> )		排水类型
M-C 摩尔库仑模型	砂垫层	0.5	28	50	0.27	1.9		排水
	回填层	0.5	38	50	0.25	1.8		
	碎石桩	0.5	38	50	0.25	1.8		
	铁矿石	0.5	40	50	0.25	2.5		

注:  $c'$ 、 $\varphi'$  为有效强度指标;  $m$  为刚度与应力相关的幂指数;  $E_{50}$  为 50% 强度处割线模量;  $E_{oed}$  为固结压缩切线刚度;  $E_{ur}$  为弹性卸载/加载模量;  $E$  为弹性模量;  $\nu$  为泊松比;  $\rho$  为密度。

3.2 钢圆筒变形分析

陆域回填后, 钢圆筒顶部向海侧位移 80 mm, 底部位移 24 mm; 由此可见钢圆筒深插后土体对筒体底部约束较好, 筒体总体向海侧偏转。一级堆载后钢圆筒顶部位移增大到 106 mm; 二级和三级堆载后, 顶部位移减小, 底部位移稍增大, 有回转的趋势。

陆域回填后钢圆筒沉降约 200 mm, 海侧稍大, 陆侧稍小。随着堆载的增大, 钢圆筒海侧沉降趋势减小, 陆侧沉降趋势增大, 反映筒体底部受到土压力的挤压稍有回转, 但总体堆载对筒体竖向的沉降量影响较小。

从陆域回填至一级堆载完成, 筒体向海侧的倾角最大约为 0.09°; 二级和三级堆载后, 筒体略有回转, 倾角逐渐减小。钢圆筒变形在规范允许的范围

4 堆载作用下离心模型试验验证

4.1 试验验证的思路

堆载作用与护岸轴线距离 120 m, 护岸轴线与堤脚距离 75 m, 若离心模型试验按原型进行缩尺, 验证护岸的稳定及变形, 模型尺寸偏大。受模型箱尺寸限制, 将堆载作用与护岸轴线距离减少至 50 m, 模型几何比尺取 120。在试验条件下, 对钢圆筒的变形特性进行分析, 反演数值模拟参数, 采用相同的参数模拟工程条件下钢圆筒的变形特性, 从而验证数值模拟结果的合理性。

4.2 试验模拟方法

模型采用与原型相同的材料进行制作, 主要控制指标为材料的弹性模量一致。原型护岸结构中钢圆筒直径 22 m、高度 62 m、壁厚 16.00 mm; 模型钢圆筒直径 183 mm、高度 516 mm、壁厚 0.13 mm。



模型地基采用原型地基土料重塑制作, 物理力学特性与原型一致, 在模型箱中自下而上逐层重塑制备。通过袖珍贯入仪测试各层不排水强度指标, 直至与原型地基及排水固结后地基强度一致。

碎石桩模型根据等效复合模量原则制备, 原型碎石桩材料采用连续级配碎石, 粒径 5~50 mm, 单桩直径 1 m, 间距 1.95 m, 置换率 20%; 模型碎石桩直径 33 mm, 桩间距 66 mm, 通过在透水纤维管内部装入粒径小于 0.25 mm 的连续级配砂砾制作而成。

排水板根据等效平均总固结度原则制备模型, 原型排水板宽 100 mm, 厚 4 mm, 正方形布置, 间距 1 m; 模型排水板转化为砂井直径 5 mm, 正方形布置, 间距 100 mm, 砂井通过在透水纤维管内部装入粒径小于 0.25 mm 的连续级配砂砾制作而成。

#### 4.3 试验结果与验证

经换算, 陆域回填后钢圆筒顶部向海侧位移 428 mm, 底部位移 26 mm。一级堆载后钢筒顶部位移增大到 454 mm, 底部位移 33 mm; 二级堆载后钢筒顶部位移增大到 463 mm; 三级堆载后钢筒顶部位移增大到 464 mm。陆域回填后钢圆筒沉降约 205 mm, 堆载完成后钢圆筒沉降约 210 mm。综上, 钢圆筒最大水平位移和沉降随堆载作用增加而增加, 但增加的速率减缓, 主要发生在第一级堆载完成后。筒体向海侧倾斜, 倾角最大值约为 0.36°。钢圆筒变形在规范允许的范围内, 但顶部位移较大, 对临近的建筑物桩基影响较大。

试验中堆载作用与护岸轴线距离为 50 m, 采用数值模拟法分析该荷载作用下钢圆筒的变形特性, 当数值模拟结果与试验结果匹配时, 相关参

数可用于模拟实际工程条件下 (堆载作用与护岸轴线距离为 120 m) 钢圆筒的变形特性, 钢圆筒护岸稳定可靠, 且顶部位移控制在 100 mm 左右, 有效保障了临近建筑物的安全。

#### 5 结论

1) 深厚软土地基条件下, 可利用深插式钢圆筒截断堆载作用下的深层滑动面, 保障投产初期护岸的整体稳定。待地基土完全固结后, 即使钢圆筒发生腐蚀, 护岸整体稳定仍可满足要求。

2) 当堆载作用距离护岸轴线 50 m 时, 钢圆筒顶部位移约 400 mm, 筒体向海侧倾斜 0.36°。当堆载作用距离护岸轴线 120 m 时, 钢圆筒顶部位移约 100 mm, 筒体向海侧倾斜 0.09°, 钢圆筒护岸稳定可靠, 通过堆载距离控制, 钢圆筒变形对重要建筑物结构影响较小。

#### 参考文献:

- [1] 朱永, 徐颖, 郑志涛. 复杂环境下爆破挤淤筑堤技术应用研究[J]. 工程爆破, 2016, 22(2): 56-60.
- [2] 刘阳, 项存平. 宽平台生态景观海堤结构稳定性试验验证[J]. 水运工程, 2021(5): 1-5.
- [3] 项国玉, 于德洲. 振冲碎石桩在海上防波堤工程中的应用[J]. 中国港湾建设, 2010(4): 56-59.
- [4] 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.
- [5] 中交四航工程研究院有限公司, 中交水运规划设计院有限公司. 水运工程结构耐久性设计标准: JTS 153—2015[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2015.

(本文编辑 赵娟)

(上接第 105 页)

- [4] 吕昌, 郭中伟, 邵作义. 湿法施工在大型船坞工程中的应用[J]. 水运工程, 2005(8): 78-81.
- [5] 张志荣. 装配式水闸在海涂淤泥地基中的应用[J]. 浙江水利科技, 1993(2): 46-50.
- [6] 张少卿. 田间装配式涵闸研究与应用[D]. 扬州: 扬州大学, 2018.
- [7] 中交第三航务工程勘察设计院有限公司. 连云港市连云新城蓝色海湾基础工程[R]. 上海: 中交第三航务工

程勘察设计院有限公司, 2021.

- [8] 中交第三航务工程勘察设计院有限公司. 一种软土地基上的整体预制型水闸闸室结构及其施工方法: CN201910511252. 3[P]. 2019-10-15.
- [9] 中交第三航务工程勘察设计院有限公司. 一种软土地基上的装配式水闸消力池结构及其施工方法: CN201910981712. 9[P]. 2020-01-17.

(本文编辑 王传瑜)