

DOI: 10.11779/CJGE2023S10018

# 固化土充填袋筑堤稳定性的离心模型试验研究

王雪奎<sup>1,2</sup>, 朱耀庭<sup>1</sup>, 胡建军<sup>1</sup>, 程明<sup>1</sup>

(1. 中交天津港湾工程研究院有限公司, 天津 300222; 2. 中交第一航务工程局有限公司, 天津 300461)

**摘要:** 固化土充填袋筑堤技术既节约了日益紧缺的砂石资源, 又解决了矿渣和疏浚弃土的处置难题, 具有广阔的应用前景。依托天津港某围堤工程, 通过开展离心模型试验, 研究以钢渣与疏浚弃土为主要原料的固化土充填袋围堤的整体稳定性和变形情况, 并分析地基中土压力和孔隙水压力变化规律, 试验结果表明: 固化土充填袋围堤和地基的沉降主要发生在填筑期, 并且沉降速率较大; 堤身范围内, 沉降呈中间大两边小的锅型分布; 从堤脚泥面的沉降曲线和孔隙水压力的消散上看, 正常情况下, 固化土充填袋围堤和地基能保持稳定状态; 固化土充填袋围堤和地基的失稳破坏现为圆弧滑动破坏, 变形以沉降为主, 水平位移较小, 土工织物充填袋对堤体水平变形有很强的约束作用, 通过离心模型试验得出的稳定安全系数为 1.59。

**关键词:** 钢渣; 疏浚弃土; 充填袋; 稳定性; 离心模型试验

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2023)S1-0218-04

**作者简介:** 王雪奎(1989—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事土工离心模型试验研究。E-mail: 454917485@qq.com。

## Centrifugal model tests on stability of maritime dams constructed by geobag-solidified soil

WANG Xuekui<sup>1,2</sup>, ZHU Yaoting<sup>1</sup>, HU Jianjun<sup>1</sup>, CHENG Ming<sup>1</sup>

(1. CCCC Tianjin Port Engineering Institute Co., Ltd., Tianjin 300222, China; 2. CCCC First Harbor Engineering Co., Ltd., Tianjin 300461, China)

**Abstract:** The technology of maritime dams constructed by geobag-solidified soil saves the increasingly scarce sand and gravel resources and solves the problem of disposal of slag and dredged spoil. It has broad application prospects. Relying on a maritime dam project in Tianjin Port, the centrifugal model tests are carried out to study the overall stability and deformation of the maritime dam filled with solidified soil using slag and dredged spoil as the main raw materials, and the variation laws of soil pressure and pore water pressure in the foundation are analyzed. The test results show that the settlements of the maritime dam constructed by geobag-solidified soil and the foundation mainly occur during the filling period, and the settlement rate is large. Within the scope of the maritime dam, the settlements are distributed in a bell shape, which are large in the middle and small at both sides. Seen from the settlement curve of the mud surface at the toe of the maritime dam and the dissipation of pore water pressure, under the normal conditions, the maritime dam filled with solidified soil and the foundation can remain stable. The instability failure of the maritime dam filled with solidified soil as well as that of the foundation is now a circular sliding one. The deformation is mainly settlement, and the horizontal displacement is small. The geotextile bag has a strong constraint on the horizontal deformation of the maritime dam. The safety factor of stability obtained through the centrifugal model tests is 1.59.

**Key words:** slag; dredged spoil; geobag; stability; centrifugal model test

## 0 引言

固化土充填袋筑堤技术是将疏浚淤泥或固体废弃物, 掺入少量的水泥等固化剂, 经过机械搅拌成均匀流动的拌和土, 然后利用机械冲灌将拌和土充入土工织物充填袋形成固化土充填袋, 最后将充填袋堆叠成堤。该技术既节约了日益紧缺的砂石资源, 又解决了矿渣和疏浚弃土的处置难题, 具有对软土地基的适应能力强、充填料固化速度快、抗风浪能力强、施工速

度快、成本低等优点, 已经在港口航道、近岸工程、水利等行业得到大量应用。

目前, 固化土充填袋筑堤技术仍处于快速发展过程中, 相关研究还处在探索阶段。当前的研究主要集中在以下 3 个方面: ①固化剂的选择上, 通过室内试验研究不同固化剂对充填料的固化强度、变形和渗透

收稿日期: 2023-07-05

表 1 充填袋材料的技术指标  
Table 1 Main properties of geobag

名称	单位质量/ (g·m <sup>-2</sup> )	抗拉强度/N/50 mm		延伸率/N/50 mm		孔径 O <sub>95</sub> /mm	渗透系数/(cm·s <sup>-1</sup> )
		经向	纬向	经向	纬向		
聚丙烯编织布	>130	>750	>800	<30	<30	≤0.05	>0.003

表 2 地基土层的主要物理力学性质  
Table 2 Main physical and mechanical properties of soil layer

土层名称	厚度/m	含水率/%	密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	固结快剪		十字板强度/ kPa
				内摩擦角 φ <sub>eq</sub> /(°)	黏聚力 c/kPa	
淤泥质黏土	20	44.6	1.78	12.2	16.9	28

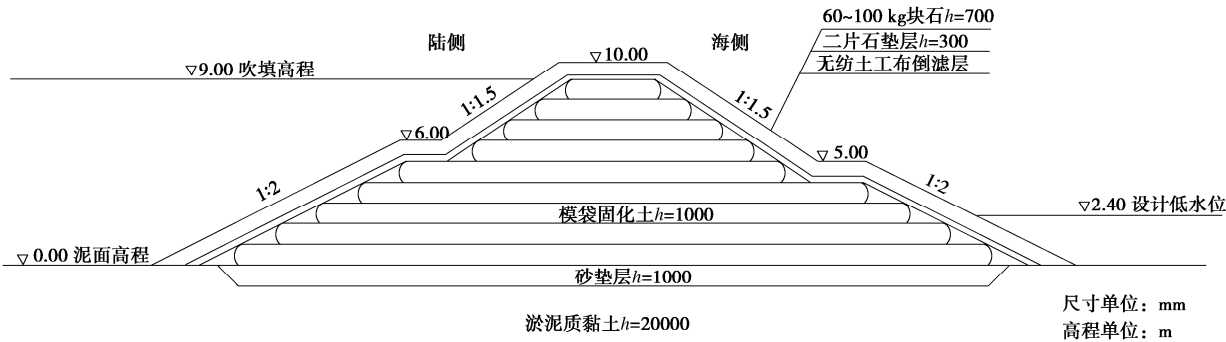


图 1 围堤的典型断面示意图

Fig. 1 Typical section diagram of embankment

性的影响<sup>[1-3]</sup>; ②固化土的加固机理, 通过图像或物相等分析方法, 研究固化剂的化学反应、种类、数量对充填料的加固机理<sup>[4-6]</sup>; ③固化土充填袋围堤的结构形式选择, 通过现场试验, 研究不同型式围堤的稳定性<sup>[7]</sup>。

本文依托天津港某围堤工程, 通过土工离心模型试验, 研究固化土充填袋围堤在软基上的整体稳定和变形情况, 以及地基中土压力和孔隙水压力变化规律, 为工程的设计和施工提供参考。

1 工程概况

天津港某围堤采用斜坡堤型式, 高度为 10 m, 顶部宽 5 m, 底部宽 44 m, 下部坡比为 1 : 2, 上部坡比为 1 : 1.5。堤体主体采用固化土充填袋堆砌而成, 每层厚度为 1 m, 共 9 层。充填袋的材质主要采用聚丙烯编织布, 其技术指标如表 1 所示。固化土为钢渣、疏浚弃土和水泥等胶凝材料, 其 7 d 养护龄期的无侧限抗压强度可以达到 0.7 MPa 以上。围堤填筑完成后, 在堤身放置二片石垫层和护面块石。地基土可简化为一层厚 20 m 淤泥质黏土, 其物理力学指标如表 2 所示。围堤陆侧吹填土的高程为 9.00 m, 海侧设计低水位高程为 2.40 m。围堤的典型断面示意图如图 1 所示。

2 试验方法

离心模型试验是在中交天津港湾工程研究院有限公司 TPEI-200 土工离心机上进行的。该离心机的容量为 200 g·t, 最大离心加速度为 200g, 旋转半径为 4 m。

根据模型几何尺寸, 模型制作、模型测量等因素, 综合选定模型的比尺为  $N=60$ 。模型箱的尺寸为 1200 mm × 600 mm × 800 mm。

模型地基土料取自天津港现场, 对淤泥质黏土土层, 以地基强度指标作为控制标准。首先将土料进行风干、碾碎, 充分浸泡使其饱和, 然后利用真空搅拌机制成饱和泥浆, 最后放入固结仪成层固结, 这样自下而上制作模型土层。地基土层固结期间, 不断用微型十字板测量土层的不排水强度, 直至模型淤泥质黏土层的平均不排水强度达到 28 kPa。

固化土采用钢渣、天津港土样、以及 P.I.42.5 硅酸盐水泥模拟。钢渣掺量为 60%, 水泥掺量为 12%, 水灰比 0.5, 天津港土样调配的泥浆含水率为 70%。固化土 7 d 养护龄期的无侧限抗压强度为 1.1 MPa。将制备好的固化土分层填筑, 填筑密度为 1.54 g/cm<sup>3</sup>, 每层用无纺布包裹。

现场采用充填袋袋布的单位质量 >130 g/m<sup>2</sup>、抗拉强度 >750/50 mm, 根据相似比尺, 模型袋布应采用单位质量 2.16 g/m<sup>2</sup>、抗拉强度 750 N/50 mm 的材料进行模拟, 但强度如此大、单位面积质量如此小的相似材料无法找到。因此, 试验中充填袋袋布采用单位质量为 60 g/m<sup>2</sup>、抗拉强度为 200 N/50 mm、延伸率为 20% 的无纺布来模拟。

二片石垫层采用 1~2 mm 的碎石来模拟, 护面块石采用 5~10 mm 的碎石来模拟。

试验过程中, 分别采用激光位移计和 LVDT 位移计对模型堤顶中心、堤身平台、堤脚泥面的沉降进行

测量；采用微型土压力计和微型孔压计，分别对围堤下地表土压力和地基中孔压进行测量。模型的布置图如图 2 所示。

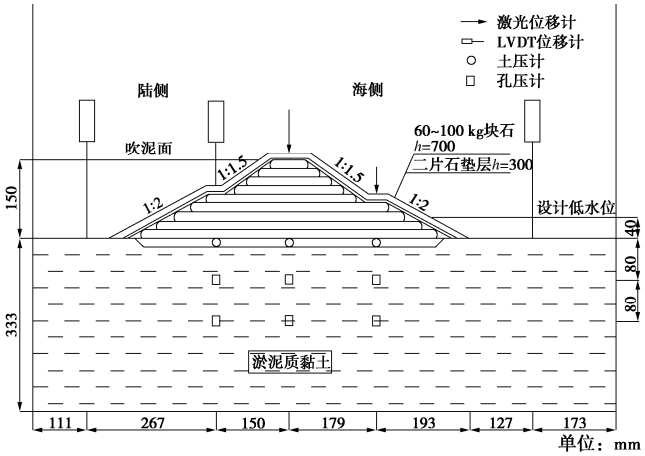


图 2 模型布置图

Fig. 2 Drawing of centrifuge model

### 3 试验结果分析

#### 3.1 沉降分析

围堤堤身和地基关键点的沉降过程曲线如图 3 所示。从图 3 中可以看出，在模拟的围堤填筑初期，由于离心加速增加较慢，各测点的沉降量缓慢增大；之后，随着离心加速度快速增加，各测点的沉降都随着时间快速增大；待离心加速度达到 60g 后，即模拟竣工后，沉降速率逐渐降低，并逐渐趋于稳定。

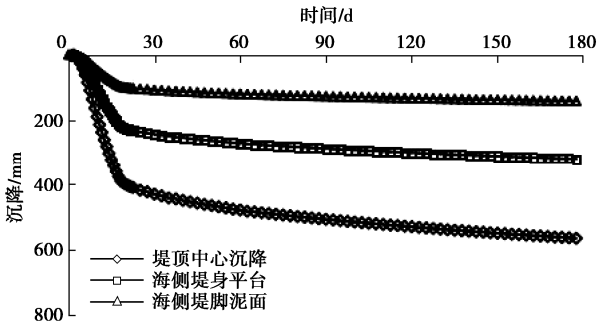


图 3 沉降过程曲线

Fig. 3 Settlement-time curves

从数值上看，堤顶中心的沉降最大，堤身平台沉降次之，坡脚泥面沉降最小，堤身范围内沉降呈中间大两边小的锅型分布。围堤填筑 20 d 后，堤顶中心的沉降为 398.6 mm，填筑期沉降速率为 19.9 mm/d；竣工 160 d 后，堤顶中心的沉降为 165.2 mm，运行期沉降速率为 1.0 mm/d，这说明围堤和地基的沉降主要发生在填筑期，并且沉降速率较大。

#### 3.2 孔隙水压力分析

图 4 为不同测点的孔隙水压力过程曲线。从图中可以看出，在围堤填筑期，地基中的孔隙水压力随着填筑荷载的增加而快速增大，竣工时达到最大值，随

后孔隙水压力稍有消散，并逐渐趋于稳定。180 d 后，仍有很大的孔隙水压力没有消散，这可能是由于地基中没有排水通道，孔隙水压力消散的很慢。从孔隙水压力的消散过程来看，孔隙水压力消散过程中没有明显突变，这说明地基没有发生整体剪切破坏，围堤和地基能够保持稳定状态。

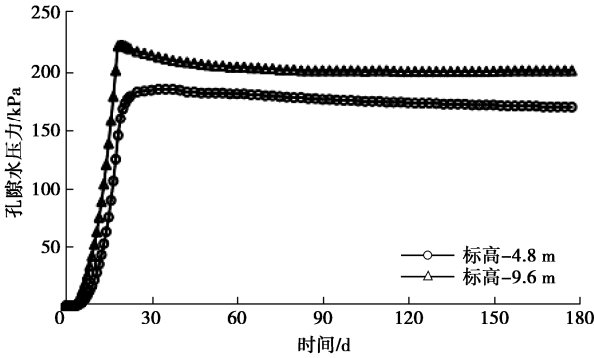


图 4 孔隙水压力过程曲线

Fig. 4 Pore water pressure-time curves

#### 3.3 地表土压力分析

图 5 为不同位置处地表土压力的过程曲线。从图 5 可以看出，围堤中心地表土压力最大，陆侧距围堤中心 9 m 处地表土压力次之，海侧距围堤中心 11 m 处地表土压力最小，这说明地表土压力也呈中间大两边小的分布。在围堤中心，试验得出的地表土压力小于上覆荷载；在围堤两侧，试验得出的地表土压力大于上覆荷载，说明固化土充填袋具有一定的匀化上覆荷载的作用。

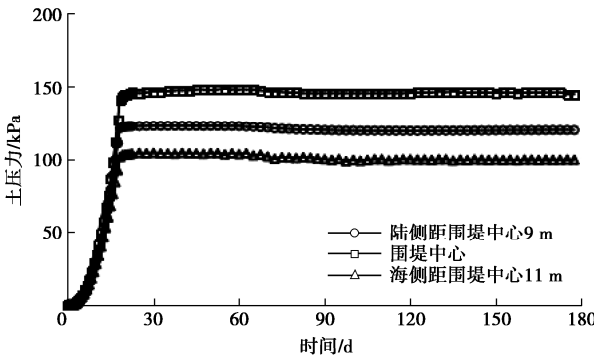


图 5 地表土压力过程曲线

Fig. 5 Surface earth pressure-time curves

#### 3.4 整体稳定性分析

前期试验结束后，通过提高离心加速度，使固化土充填袋围堤产生失稳破坏，从而研究围堤和地基的整体破坏形式和稳定安全系数。图 6 为固化土充填袋围堤破坏时各关键点沉降与离心加速度的关系曲线。从图 6 可以看出，当离心加速度小于某一临界加速度时，堤顶中心、海侧堤身平台、海侧堤脚泥面的沉降均随加速度的增加而缓慢增大；当离心加速度大于该临界加速度时，堤顶中心、海侧堤身平台的沉

降随加速度的增加而快速增加, 曲线斜率明显增大, 海侧堤脚泥面的沉降却随着加速度的增加而降低, 这说明堤脚泥面逐渐隆起, 围堤整体出现失稳破坏迹象。在离心模型试验中, 可以根据围堤整体开始出现失稳破坏时的临界加速度与设计加速度之比来确定整体稳定安全系数<sup>[8]</sup>。在本试验中, 临界加速度为  $95.1g$ , 设计加速度为  $60g$ , 故通过离心模型试验得出的稳定安全系数为  $1.59$ 。从破坏现象上看, 固化土充填袋围堤和地基的整体破坏表现为圆弧滑动破坏, 变形以沉降为主, 水平位移较小, 土工织物充填袋对堤体水平变形有很强的约束作用。

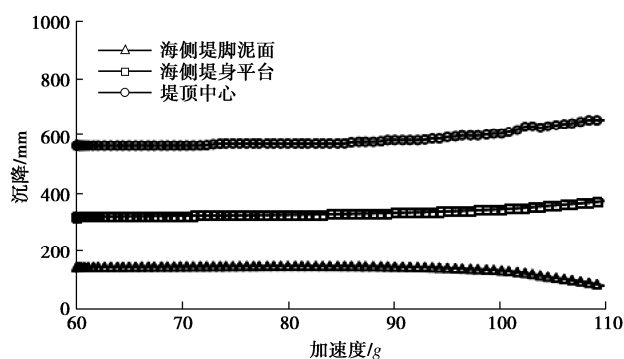


图 6 沉降与离心加速度关系曲线

Fig. 6 Settlement-centrifugal acceleration curves

## 4 结 论

本文通过离心模型试验, 研究了固化土充填袋筑堤的整体稳定和变形情况, 地基中土压力和孔隙水压力变化规律, 得到 3 点结论。

(1) 固化土充填袋围堤和地基的沉降主要发生在填筑期, 并且沉降速率较大; 堤身范围内, 沉降呈中间大两边小的锅型分布。

(2) 从堤脚泥面的沉降曲线和孔隙水压力的消散上看, 正常情况下, 固化土充填袋围堤和地基能保持稳定状态。

(3) 固化土充填袋围堤和地基的失稳破坏现为圆弧滑动破坏, 变形以沉降为主, 水平位移较小, 土工织物充填袋对堤体水平变形有很强的约束作用。在本试验中, 临界加速度为  $95.1g$ , 设计加速度为  $60g$ , 通过离心模型试验得出的稳定安全系数为  $1.59$ 。

## 参考文献:

[1] 刘爱民. 低掺量水泥固化土的强度影响因素分析[J]. 水运工程, 2007(2): 24-27. (LIU Aimin. Factors influencing the

strength of low mix-proportion soil cement[J]. Port & Waterway Engineering, 2007(2): 24-27. (in Chinese))

- [2] 缪志萍. 堤防水泥固化培土强度的试验研究[J]. 华东船舶工业学院学报(自然科学版), 2005, 19(5): 20-24. (MIAO Zhiping. Laboratory study on unconfined strength of cement-stabilized soil in embankment[J]. Journal of East China Shipbuilding Institute (Natural Science Edition), 2005, 19(5): 20-24. (in Chinese))
- [3] 郭 印, 徐日庆, 邵允铖. 淤泥质土的固化机理研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2008, 42(6): 1071-1075. (GUO Yin, XU Riqing, SHAO Yuncheng. Study on mechanism of muddy soil stabilization[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2008, 42(6): 1071-1075. (in Chinese))
- [4] 黄 新, 宁建国, 郭 晔, 等. 水泥含量对固化土结构形成的影响研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(4): 436-441. (HUANG Xin, NING Jianguo, GUO Ye, et al. Effect of cement content on the structural formation of stabilized soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(4): 436-441. (in Chinese))
- [5] 郭 印. 淤泥质土的固化及力学特性的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2007. (GUO Yin. Study on Stabilization of Muddy Soil and Mechanical Properties of Stabilized Soil[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007. (in Chinese))
- [6] 汤怡新, 刘汉龙, 朱 伟. 水泥固化土工程特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(5): 549-554. (TANG Yixin, LIU Hanlong, ZHU Wei. Study on engineering properties of cement-stabilized soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(5): 549-554. (in Chinese))
- [7] 王文杰, 余祈文, 宋立松, 等. 土工充泥袋抛坝促淤试验研究与实践[J]. 水利学报, 2003, 34(2): 88-92, 97. (WANG Wenjie, YU Qiwen, SONG Lisong, et al. Experimental study and practice of constructing disk by using woven geotextile bags[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003, 34(2): 88-92, 97. (in Chinese))
- [8] 王年香, 顾行文, 任国峰, 等. 充填土袋堤变形与稳定离心模型试验研究[J]. 工程勘察, 2014, 42(11): 1-5. (WANG Nianxiang, GU Xingwen, REN Guofeng, et al. Centrifuge model tests on deformation and stability of embankment with soil-filled geotextile bags[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2014, 42(11): 1-5. (in Chinese))

(编校: 胡海霞)