

DOI: 10.11779/CJGE2021S2019

# 水平荷载下沉井在砂土中变位特性的试验与模拟研究

赵小晴<sup>1</sup>, 詹伟<sup>\*2</sup>, 严鑫<sup>2</sup>, 王金昌<sup>1</sup>, 杨仲轩<sup>1</sup>, 龚晓南<sup>1</sup>

(1. 浙江大学建筑工程学院, 浙江 杭州 310058; 2. 浙江省交通运输科学研究院, 浙江省道桥检测与养护技术研究重点实验室, 浙江 杭州 310023)

**摘要:** 为研究水平荷载条件下锚碇沉井基础在砂土中的变形特征, 在砂土地基中开展了 1g 的室内模型试验。依托模型试验通过 PLAXIS 3D 软件建立了有限元模型, 并结合沉井盖板处的位移、沉井前侧的土压力及沉井底部的土压力进行了分析。数值模拟的结果和试验结果拟合较为一致, 说明 PLAXIS 3D 软件能够较好的模拟锚碇沉井基础在砂土中的受力变形性能, 可为锚碇沉井基础与土体相互作用机理的研究进一步提供技术支持。

**关键词:** 沉井; 砂土; 变位特性; 模型试验; 数值模拟

中图分类号: TU431

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2021)S2-0080-04

**作者简介:** 赵小晴(1995—), 女, 博士研究生, 主要从事锚碇基础方面的科研工作。E-mail: xqzhao@zju.edu.cn。

## Experimental study and simulation on deformation characteristics of caissons in sand under horizontal loads

ZHAO Xiao-qing<sup>1</sup>, ZHAN Wei<sup>2</sup>, YAN Xin<sup>2</sup>, WANG Jin-chang<sup>1</sup>, YANG Zhong-xuan<sup>1</sup>, GONG Xiao-nan<sup>1</sup>

(1. Department of Civil Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 2. Key Laboratory of Road and Bridge Detection and Maintenance Technology Research of Zhejiang Province, Hangzhou 310023, China)

**Abstract:** In order to study the deformation characteristics of caissons buried in sand under horizontal loads, a group of laboratory 1g model tests are carried out in sand foundation. Based on the model tests, the finite element model is established through the software PLAXIS 3D, and the displacements of the caisson cover and the soil pressures at the front side and the bottom of the caisson are analyzed. The results of the numerical simulation fit well with the test ones, indicating that the software PLAXIS 3D can simulate the load and deformation performance of caissons in sand, which may provide technical supports for further researches on the interaction mechanism between caissons and soil.

**Key words:** caisson; sand; deformation performance; model test; numerical simulation

## 0 引言

随着中国交通行业的不断发展, 中国桥梁建设水平得到大幅提升, 对桥梁跨越能力的要求也不断增长, 悬索桥作为所有桥型中跨越能力最大的桥型, 越来越成为跨越大江、大河的主要解决方案。但是随着悬索桥跨度的不断增加, 锚碇规模急剧扩大, 造成锚碇建设成本过高。因此研究锚碇沉井基础的受力变形特性对于悬索桥的锚碇优化设计显得尤为重要。

Alampalli<sup>[1]</sup>在 1994 年研究了沉井在承受竖向和水平向荷载时的结构响应; 李永盛<sup>[2]</sup>和李家平等<sup>[3]</sup>分别在 1995 年和 2005 年通过模型试验探讨了沉井基础的变形机制和破坏失稳形式; 穆保岗等<sup>[4]</sup>在 2017 年通过模型试验研究了水平荷载长期作用下沉井变位的特性; Liu 等<sup>[5]</sup>在 2019 年通过模型试验结合数值模拟分析研究了重力式锚碇的稳定性。

本文首先进行了在分级水平荷载下的沉井在砂箱

中的模型试验, 然后基于 PLAXIS 3D 软件建立了有限元模型, 并分析了沉井的位移及沉井前侧和沉井底部的土压力, 研究了水平荷载条件下沉井的受力变形规律。

## 1 依托工程及模型试验

本文依托南京仙新路大桥北锚碇沉井工程, 沉井长度为 70 m, 宽度为 50 m, 高度为 49.5 m。该工程地基土以粉砂和中砂为主。

本试验采用的模型槽平面尺寸为 4.0 m×2.0 m, 高 1.0 m。地基土采用中砂, 其相对密度为 2.68, 最大孔隙比 0.881, 最小孔隙比 0.463, 不均匀系数 3.89,

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(52078457); 浙江省交通运输厅科技计划项目(2020050)

**收稿日期:** 2021-08-19

**\*通信作者** (E-mail: zhanwei@zju.edu.cn)

表 1 土层参数  
Table 1 Soil parameters

土层	$\gamma$ ( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ )	$e$	$E_s$ ( $\text{MPa}$ )	$E_{\text{ood}}^{\text{ref}}$ ( $\text{MPa}$ )	$E_{50}^{\text{ref}}$ ( $\text{MPa}$ )	$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ ( $\text{MPa}$ )	$c'$	$\varphi'$ ( $^{\circ}$ )	$\psi$ ( $^{\circ}$ )	$m$
砂土	15.6	0.723	10.2	10.2	10.2	30.6	0	34.5	0	0.5

注： $\gamma$  为砂土的重度； $e$  为砂土的孔隙比； $E_s$  为砂土的压缩模量； $E_{\text{ood}}^{\text{ref}}$  为砂土的主固结加载切线刚度； $E_{50}^{\text{ref}}$  为砂土的标准三轴排水试验割线刚度； $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$  为砂土的卸载重加载刚度； $c'$  为砂土的有效黏聚力； $\varphi'$  为砂土的有效摩擦角； $\psi$  为砂土的膨胀角； $m$  为砂土的刚度应力水平相关幂值。

曲率系数 0.92。模型试验分层填筑地基土，控制每层填土的厚度为 0.1 m，最终得到地基土的干密度为 1.55  $\text{g}/\text{cm}^3$ ，含水率 0.63%，相对密实度为 59.61%，内摩擦角为  $34.5^{\circ}$ （快剪）。

沉井模型平面尺寸为 0.7 m $\times$ 0.5 m，高 0.495 m，由厚度为 22 mm 的钢板焊接而成，试验过程将沉井看成刚体，不考虑沉井自身的变形，为模拟沉井与土体相互作用的界面，通过在沉井表面黏 2~3 mm 的砂粒实现<sup>[6]</sup>，如图 1 所示。



图 1 沉井界面的处理

Fig. 1 Surface treatment for cassion

模型试验中设计荷载为 62kg，本文中水平荷载分级施加，每级荷载为设计荷载的~0.5 倍，试验过程中每级荷载施加持续 15 min 直至土体破坏（土体破坏表现为沉井盖板处的位移急剧增大），沉井加载示意图如图 2 所示。

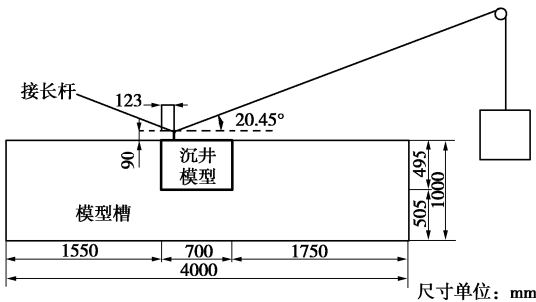


图 2 沉井加载示意图

Fig. 2 Schematic diagram of cassion under loading

2 有限元分析

本研究建立的有限元模型完全基于模型试验，土体及沉井的单元形状均为四面体十节点实体单元，数值模型的网格如图 3 所示。

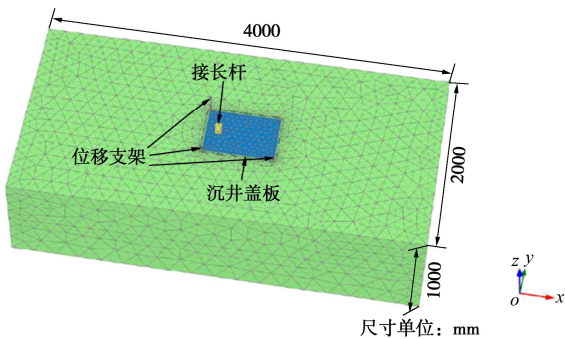


图 3 有限元模型网格

Fig. 3 Mesh of finite element model

砂土的本构模型采用土体硬化（HS）模型，土层参数<sup>[7]</sup>取值见表 1。

3 试验结果与有限元结果对比

3.1 沉井顶部位移

在沉井盖板顶部设置 3 个位移测量点 A、B、C。在位移测量点上放置位移靶标，采用 TH-ISM-ST 机器视觉测量仪对靶标位移进行测量，分辨率为 0.01 mm，靶标布置如图 4。

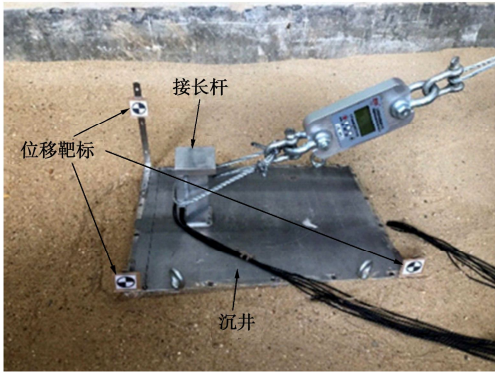


图 4 靶标布置图

Fig. 4 Layout of targets

模型试验和数值模拟的位移对比如图 5 所示, 由图易知, 模型试验和数值模拟的靶标位移较为一致, 本文中取水平位移随设计荷载增加而不断增加的线弹性阶段为水平承载力极限值<sup>[4]</sup>, 即安全系数取值为 4。

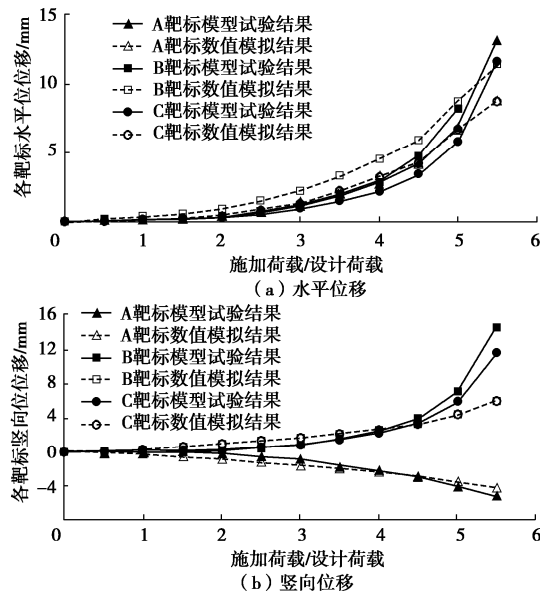


图 5 模试验和数值模拟的位移对比

Fig. 5 Comparison of displacements between model tests and numerical simulations

3.2 沉井前侧壁土压力随施加荷载变化

在沉井前侧设置 8 个土压力盒, 布置如图 6 所示, 由于土压力盒对称分布, 且沉井左右侧完全对称, 因此取沉井左右两侧土压力盒平均值作为最终结果, 结果如图 7 所示, 其中模型试验中 3 号及 3' 号土压力盒数据较差, 本文中已舍弃, 余下的沉井前侧土压力盒数据和数值模拟结果较吻合。

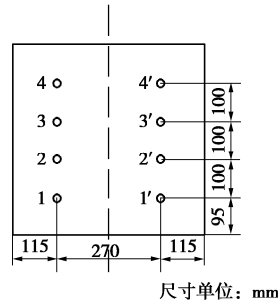


图 6 沉井前侧土压力盒布置图

Fig. 6 Layout of earth pressure cells on front side of caisson

3.3 沉井前侧壁土压力随施加荷载变化

在沉井底部设置 12 个土压力盒, 布置如图 8 所示, 同理, 取沉井左右两侧土压力盒平均值作为最终结果, 结果如图 9 所示, 其中 8 号及 8' 号土压力盒数据较差, 本文中已舍弃, 余下的沉井底部土压力盒数据和

数值模拟结果对比, 发现当施加荷载/设计荷载的值小于等于 4 时较一致, 当其值大于 4 之后, 二者的结果相差较大。

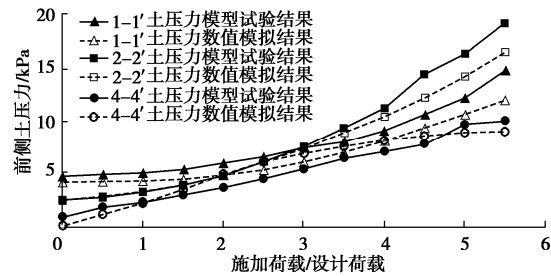


图 7 模试验和数值模拟的沉井前侧土压力对比

Fig. 7 Comparison of soil pressures on front side of caisson between model tests and numerical simulations

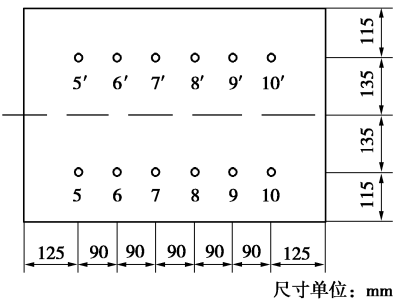


图 8 沉井底部土压力盒布置图

Fig. 8 Layout of earth pressure cells on bottom of caisson

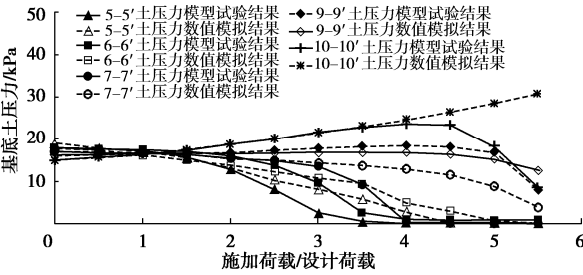


图 9 模型试验和数值模拟的沉井前侧土压力对比

Fig. 9 Comparison of soil pressures on bottom of the caisson between model tests and numerical simulations

4 结 论

本文在已有的研究基础上, 通过开展模型试验和数值模拟计算, 得到水平荷载下沉井的受力变位特性, 主要得出以下结论:

(1)对锚碇沉井基础在砂土中的受力变位特性进行了试验研究和有限元分析, 结果显示, 水平荷载下锚碇沉井基础在砂土中的破坏模式为倾覆破坏, 且安全系数远大于 2, 说明现阶段规范<sup>[8]</sup>中锚碇设计较为保守, 有进一步的优化空间。

(2) 通过 PLAXIS 3D 软件建立了锚碇沉井基础的有限元模型, 采用应变硬化的本构模型, 结果表明模型试验的结果和有限元模型计算的结果较为一致, 说明数值建模过程中的土体本构模型及参数取值可靠, 表明 PLAXIS 3D 软件能够较好的模拟锚碇沉井在砂土中的受力变形行为。

上述模型试验和有限元分析, 只是针对水平荷载条件下锚碇沉井基础在砂土中的受力特性开展的研究, 只考虑了单层干砂的地基土层, 尚需更进一步探索。

#### 参考文献:

- [1] ALAMPALLI S, PEDDIBOTLA V. Model tests on caissons[C]// Proceedings of the Conference on Vertical and Horizontal Deformations of Foundations and Embankments, 1994, New York.
- [2] 李永盛. 江阴长江公路大桥北锚碇模型试验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 1995, 4(2): 134 - 140. (LI Yong-sheng. Model test research on the north anchorage of Jiangyin Yangtze River Highway Bridge[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 1995, 4(2): 134 - 140. (in Chinese))
- [3] 李家平, 张子新, 黄宏伟, 等. 宁波庆丰大桥锚碇室内相似模型试验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2005, 4(8): 1011 - 1016. (LI Jia-ping, ZHANG Zi-xin, HUANG Hong-wei, et al. Research on similarity model test of anchorage of Qingfeng Suspension Bridge in Ningbo[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2005, 4(8): 1011 - 1016. (in Chinese))
- [4] 穆保岗, 李旭, 龚维明, 等. 水平荷载长期作用下沉井变位特性的模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(8): 1388 - 1397. (MU Bao-gang, LI Xu, GONG Wei-ming, et al. Model tests on deformation characteristics of caissons under long-term horizontal load[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(8): 1388 - 1397. (in Chinese))
- [5] LIU X, SHAO G J, HUANG J S, et al. Stability analysis of gravity anchorage: a case study of Taizhou Yangtze River Bridge[J]. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2021, 25(6): 1002 - 1024.
- [6] 吴九江, 程谦恭, 文华, 等. 软土地基格栅式地下连续墙与群桩桥梁基础竖向承载性状对比模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(9): 1733 - 1744. (WU Jiu-jiang, CHENG Qian-gong, WEN Hua, et al. Vertical bearing behaviors of lattice shaped diaphragm walls and group piles as bridge foundations in soft soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(9): 1733 - 1744. (in Chinese))
- [7] BRINKGREVE R B J, BROERE W. Plaxis Material Models Manual[M]. Netherlands: Plaxis bv, Delft, 2017.
- [8] 公路悬索桥设计规范: JTG/T D65-05—2015E[S]. 2015. (Specifications for Design of Highway Suspension Bridge: JTG/T D65-05—2015E[S]. 2015. (in Chinese))

(编校: 黄贤沙)