

DOI: 10.11779/CJGE2021S2021

回填荷载下桶式基础护岸变形与稳定数值分析

韩 迅¹, 王墨璠^{*2}, 武颖利¹

(1. 南京水利科学研究院岩土工程研究所, 江苏 南京 210024; 2. 重庆交通大学, 重庆 400074)

摘 要: 桶式基础是一种适用于近海软土地基的新型结构, 结合连云港港徐圩港区护岸工程, 建立了桶式基础护岸三维有限元模型, 分析了不同回填荷载和水位条件下桶壁土压力和结构位移变化规律。结果表明: 回填荷载下桶壁土压力大小主要受到海侧水位的影响, 随着水位降低, 港侧和海侧桶壁土压力皆有增大趋势; 在结构位移和转动共同控制下, 港侧桶壁土压力沿深度存在主动和被动区转换现象; 回填荷载下结构存在向港侧倾斜和海侧移动的趋势。成果为桶式基础结构的稳定性研究提供了依据。

关键词: 桶式基础; 土压力; 位移; 数值模拟

中图分类号: TU476

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2021)S2-0088-04

作者简介: 韩 迅(1991—), 男, 博士, 主要从事海洋岩土工程及近海工程等方面的研究工作。E-mail: xhan@nhri.cn。

Numerical analysis of deformation and stability of bucket foundation revetment under backfill loads

HAN Xun¹, WANG Mo-pan², WU Ying-li¹

(1. Department of Geotechnical Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China; 2. Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: Bucket foundation is a new type of structure suitable for offshore soft soil foundation. Combining with the revetment project of Xuwei harbour district of Lianyungang Port, the three-dimensional finite element model for the bucket foundation revetment is established, and the variation laws of structural stress and earth pressure on the bucket wall and structural displacement under different backfill loads and water levels are analyzed. The results show that the earth pressure on the bucket wall is mainly affected by the water level on the sea side. With the decreasing water level, the earth pressures on both the port and the sea side increase. Under the joint control of structural displacement and rotation, the earth pressure on the wall of the port side shows the phenomenon of active and passive zone transitions along the depth. Under the backfill loads, the structure tends to incline to the port side and move towards the sea side. The research results may provide a basis for the stability study of bucket foundation structure.

Key words: bucket foundation; earth pressure; displacement; numerical analysis

0 引 言

我国拥有近 4000 km 的淤泥质海岸线, 沿线海床深厚软土具有高含水率、高孔隙比、高压缩性和超低强度特征, 给护岸、防波堤等工程建设带来巨大挑战。随着港口建设朝着大型化、深水化的格局发展, 如何在深厚软土地基上进行护岸建设并确保其稳定, 已成为迫在眉睫的关键课题。桶式基础结构是一种适用于近海软土地基的新型结构, 每一组桶式基础结构由 1 个椭圆桶体和 2 个上部圆桶体组成, 基础桶体呈椭圆形, 桶内通过隔板划分为九个隔舱, 2 个上部圆桶体坐落在基础桶的底板上, 如图 1 所示。该种新型结构已应用于连云港港徐圩港区 30 万吨级航道工程护岸和防波堤建设, 具有造价经济、占用海域面积小、施

工速度快、绿色无污染等优点。

桶式基础结构港侧回填形成直立岸壁形成码头结构的一部分, 在该过程中回填土体一方面对上桶产生向海侧的推力与弯矩, 另一方面又作用在下桶的上表面, 产生向下的压力与向港侧的弯矩, 此外还需进一步考虑海侧不同水位的影响。结构自身荷载和外界荷载作用于土体, 土体对结构施加摩擦力、端阻力和水平抗剪力抵抗变形, 因此桶式基础护岸结构的变形与稳定核心问题是解释结构与地基在荷载作用下的共

基金项目: 南京水利科学研究院院基金项目 (Y321008, Y319006, Y319012)

收稿日期: 2021-08-21

*通信作者 (E-mail: 2829348204@qq.com)

同作用规律。近年来, 针对该种新型结构, 李武等^[1]通过物理模型试验和数值模拟研究了水平波浪荷载作用下结构的稳定性。曹永勇等^[2]和蔡正银等^[3]分别采用原型观测和数值模拟研究了下沉过程中结构受到的土压力和孔隙水压力分布规律。王元战等^[4]和蒋敏敏等^[5]对类似筒形结构的土压力特征进行了有限元分析。以上研究丰富了桶型基础结构的设计和计算理论, 然而对于多种回填工况下新型桶式基础结构的变形与稳定缺乏进一步的分析。

本文针对回填荷载作用下桶式基础护岸应力、土压力和位移变化, 采用南京水利科学研究院自主开发三维有限元软件 Geo-Marine 建立桶式基础护岸三维有限元模型, 研究桶式基础护岸结构与地基的相互作用机制, 为新型桶式基础结构的进一步推广应用提供技术建议。

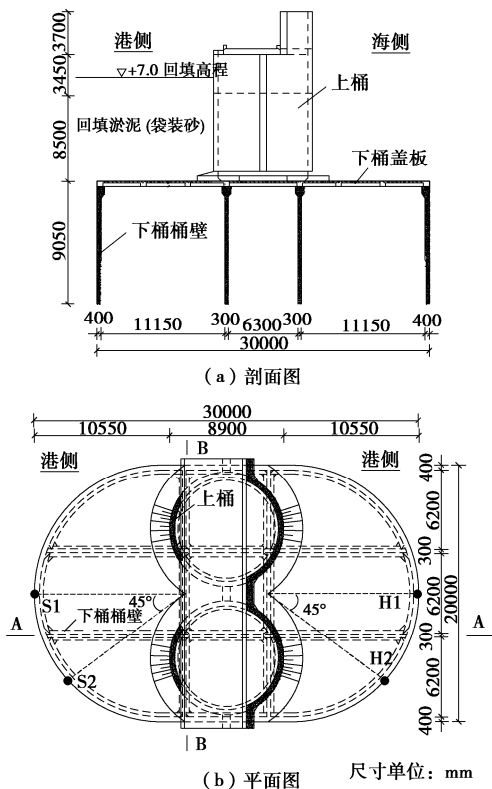


图 1 桶式基础护岸结构

Fig.1 Bucket foundation revetment

1 有限元模型的建立

1.1 南水模型

沈珠江院士提出的“南水模型”——双屈服面弹塑性模型, 服从广义塑性力学理论。该模型把屈服面看作是弹性区域的边界, 采用塑性系数的概念代替传统的硬化参数的概念, 南水模型屈服面由椭圆函数和幂函数组成, 如下式所示:

$$f_1 = p^2 + r^2 \tau^2 \quad (1)$$

$$f_2 = \tau^s / p \quad (2)$$

式中, f_1 和 f_2 为屈服面, p 为平均主应力, τ 为等效剪应力, r 为椭圆长短轴之比, s 为幂次。通过三轴排水试验可以获得连云港港徐圩护岸工程地基土体的南水模型参数, 如表 1 所示。

1.2 计算参数

地基土体的初始侧压力系数 K_0 一方面决定了护岸结构下桶与地基之间摩擦力的大小, 另一方面作为土体的水平抗力对结构的变形与整体稳定性起决定性的作用。本文中通过下式计算 K_0 :

$$K_0 = 1 - \sin \varphi \quad (3)$$

式中, φ 为土体的内摩擦角。对于淤泥层, $\varphi=2.3^\circ$, $K_0=0.96$; 对于粉质黏土层, $\varphi=11.5^\circ$, $K_0=0.8$ 。

地基土体与护岸上下桶结构接触面的摩擦系数通过离心模型试验获得, 根据离心模型试验结果, 得到结构与土体之间摩擦系数取值为 0.115。

1.3 模型构建

为消除边界效应, 选取三个桶式结构段作为研究对象, x 轴方向为护岸轴线方向, 跨度为 60 m (3 个桶的宽度), y 轴方向为垂直护岸轴线方向, y 轴正向指向海侧, 负向指向港侧, 从护岸结构两侧边缘向海侧和港侧各延伸 50 m, y 方向宽度 100 m, z 方向为竖直方向, 模型底部取到 -35 m 高程, 下桶桶底以下土层厚度为 21 m。

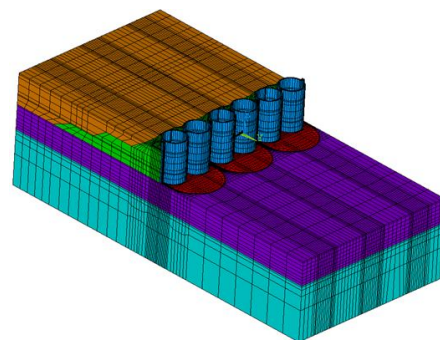


图 2 护岸结构有限元网格示意图

Fig. 2 Finite element mesh of revetment

模型底部施加 3 个方向约束, 周围施加法向约束, 如图 2 所示。地基模型设置为长方体, 模拟过程中不考虑土层的空间变化, 针对不同性质的土层, 采用三维实体单元模拟, 土体的应力应变关系采用南水双屈服面土体本构模型。桶式护岸结构由上、下桶体组成, 均为钢筋混凝土材料, 采用线弹性实体单元模拟, 材料的本构模型采用线弹性模型。该单元不仅可以考虑结构的变形和弯曲, 而且还能获得结构的应力及弯矩。本研究主要关注护岸在港侧回填至 +7.0 m 高程条件下的整体稳定性, 包括回填淤泥和回填袋装砂两种情况,

表1 土性参数

Table 1 Properties of soils

| 土样名称 | c/kPa | $\varphi_0/(^\circ)$ | $\Delta\varphi$ | R_f | K | K_{ur} | n | c_d | r_d | n_d |
|------|---------|----------------------|-----------------|-------|------|----------|------|--------|-------|-------|
| 淤泥 | 3 | 27.2 | 1.48 | 0.87 | 23.0 | 46 | 0.87 | 0.0830 | 0.133 | 0.53 |
| 粉质黏土 | 2 | 31.5 | 3.40 | 0.70 | 67.5 | 135 | 0.70 | 0.0383 | 0.350 | 0.73 |

表2 回填材料计算参数

Table 2 Parameters of backfill materials

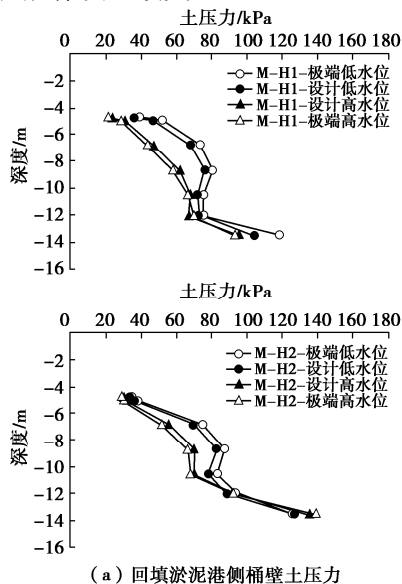
| 回填材料 | 重度/($kN \cdot m^{-3}$) | 弹性模量/MPa | 泊松比 |
|------|--------------------------|----------|------|
| 淤泥 | 14.0 | 2.3 | 0.49 |
| 袋装砂 | 16.0 | 20 | 0.31 |

计算时按照弹性材料考虑(如表2所示)。每种回填情况又分为4种水位:极端高水位(6.56 m)、设计高水位(5.41 m)、设计低水位(0.47 m)和极端低水位(-0.68 m)。

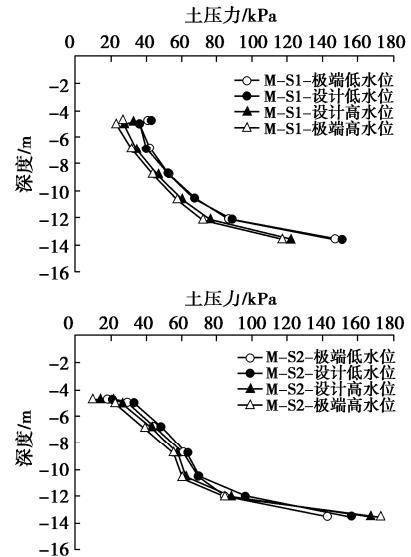
2 计算结果及分析

2.1 回填荷载下土压力分布规律

图3和图4给出了不同工况下桶壁土压力沿深度分布曲线(图中M和B分别表示回填淤泥和袋装砂情况,H1,H2和S1,S2为土压力分析点,位置如图1所示)。对于港测桶壁土压力,极端低水位为最不利工况,此时土压力最大,而对于海侧桶壁土压力,极端低水位和设计低水位情况下差别较小。对比H1和H2土压力可知,土压力沿着桶壁环向从港侧逐渐向海侧过渡时,压力逐渐趋向于静止土压力,在不同深度处,当处于被动区时,变化趋势为减小,当处于主动区时,变化趋势为增大,从图5可以看出回填淤泥情况下在-4.75~-6.83 m深度范围内土压力处于被动区,在-6.83~-13.5 m深度范围内土压力处于主动区域;在回填袋装砂情况下桶所有深度范围土压力都处于被动区,这是由于不同回填材料对结构的作用不同导致结构变形不同(详见2.3节),从而导致桶壁土压力的变化规律发生改变。



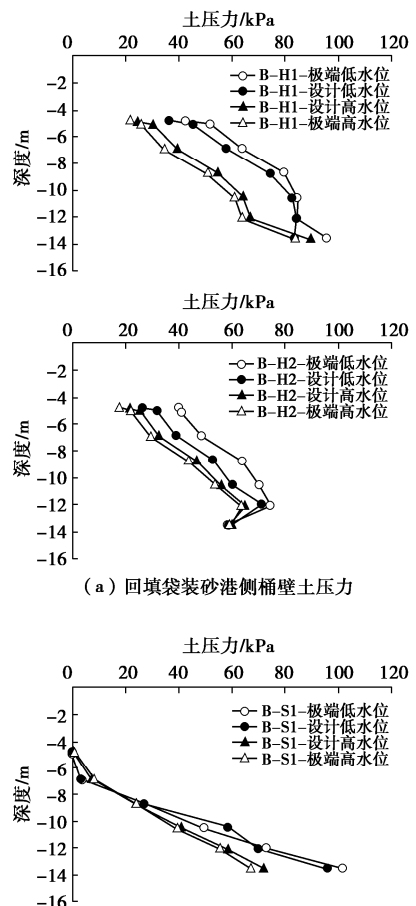
(a) 回填淤泥港侧桶壁土压力



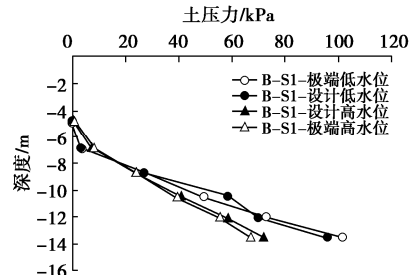
(b) 回填淤泥海侧桶壁土压力

图3 回填淤泥工况下桶壁土压力

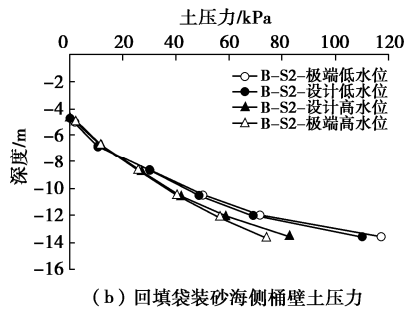
Fig. 3 Earth pressures on bucket wall under backfilling sludge



(a) 回填袋装砂港侧桶壁土压力



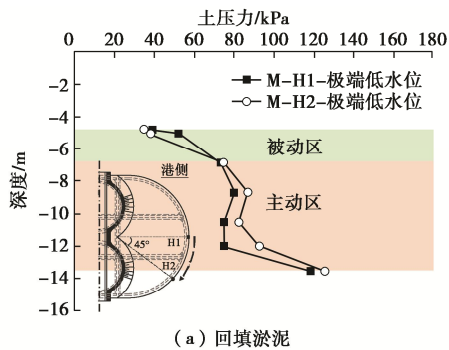
(a) 回填袋装砂海侧桶壁土压力



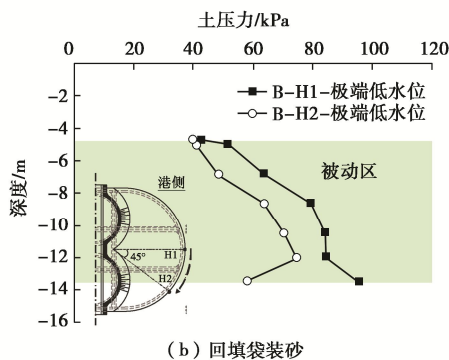
(b) 回填袋装砂海侧桶壁土压力

图 4 回填袋装砂工况下桶壁土压力

Fig. 4 Earth pressures on bucket wall under backfilling sand bags



(a) 回填淤泥



(b) 回填袋装砂

图 5 港侧桶壁土压力环向变化趋势

Fig. 5 Circumferential variation trend of earth pressure on bucket wall

2.2 回填荷载下结构位移分布规律

极端低水位情况下港侧吹填淤泥后, 结构最大竖向位移为 18.6 cm, 发生在下桶港侧边缘位置, 最小竖向位移为 6.3 cm, 发生在下桶海侧边缘位置; 最大水平位移为 16.7 cm, 发生在下桶底部位置, 指向海侧, 最小水平位移为 6.9 cm, 发生在结构顶部位置, 指向海侧, 结构向港侧倾斜 0.235° 。极端低水位情况下港侧回填袋装砂后, 结构最大竖向位移为 26.4 cm, 方向向下, 发生在下桶港侧边缘位置, 最小竖向位移为 2.8 cm, 方向向下, 发生在下桶海侧边缘位置; 最大水平位移为 15.8 cm, 指向海侧, 发生在结构底部, 最小水平位移为 3.2 cm, 指向港侧, 发生在结构顶部, 结构向港侧倾斜 0.451° 。因此回填淤泥条件下护岸整体向海侧移动, 进一步解释了港侧部分深度范围由被动土压力转为主动土压力的现象。

3 结 论

本文建立了回填荷载作用下桶式基础护岸三维有限元模型, 分析了不同回填材料和水位工况下护岸结构变形和稳定性, 主要结论如下:

(1) 同种回填材料下, 桶壁土压力大小主要受到海侧水位的影响, 随着水位降低, 港侧和海侧桶壁土压力皆有增大趋势, 且港侧变化更为明显。

(2) 在结构位移和转动共同控制下, 港侧桶壁土压力沿深度存在主动和被动区转换现象, 因此在抗滑、抗倾计算中应考虑不同深度处的压力分布规律变化。

(3) 港侧回填淤泥情况下, 桶式基础护岸向海侧移动, 向港侧倾斜; 回填袋装砂情况下, 结构底部向海侧移动, 顶部向港侧移动, 整体向港侧倾斜。

参考文献:

- [1] 李 武, 陈 魁, 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, 32(5): 14 - 18. (LI Wu, CHEN Su, CHENG Ze-kun, et al. Stability study of bucket-based structure on horizontal loading[J]. China Harbour Engineering, 2012, 32(5): 14 - 18. (in Chinese))
- [2] 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. (CAO Yong-yong, CAI Zheng-yin, GUAN Yun-fei, et al. Stability tests for new bucket-based breakwater driven by negative pressure[J]. Port & Waterway Engineering, 2014(7): 41 - 45. (in Chinese))
- [3] 蔡正银, 杨立功, 何 勇, 等. 新型桶式基础防波堤下沉分析及其对稳定性的影响[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(12): 2287 - 2294. (CAI Zheng-yin, YANG Li-gong, HE Yong, et al. Installation of new bucket foundation breakwater and its influence on stability[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(12): 2287 - 2294. (in Chinese))
- [4] 王元战, 肖 忠, 李元音, 等. 筒型基础防波堤土压力性质的有限元分析[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(4): 622 - 627. (WANG Yuan-zhan, XIAO Zhong, LI Yuan-yin, et al. Finite element analysis for earth pressure on bucket foundation of breakwater[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(4): 622 - 627. (in Chinese))
- [5] 蒋敏敏, 蔡正银, 肖昭然. 箱筒型基础防波堤基础筒土压力数值模拟研究[J]. 水运工程, 2012(3): 20 - 23, 72. (JIANG Min-min, CAI Zheng-yin, XIAO Zhao-ran. Numerical study on earth pressure on foundation bucket of bucket foundation breakwater[J]. Port & Waterway Engineering, 2012(3): 20 - 23, 72. (in Chinese))