

DOI: 10.11779/CJGE20240960

深厚软土地基中桶式基础护岸的变位模式研究

潘卓杰^{1,2}, 关云飞^{*1}, 李武³, 韩迅¹, 张红梅⁴

(1. 南京水利科学研究院岩土工程研究所, 江苏 南京 210024; 2. 河海大学土木与交通学院, 江苏 南京 210024; 3. 中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 上海 200032; 4. 南京水利科学研究院港口航道泥沙工程交通行业重点实验室, 江苏 南京 210029)

摘要: 桶式基础结构常应用于深厚软土地基中作为防波堤或护岸, 尤其作为护岸时受荷情况复杂。为探究不同阶段回填荷载作用下桶式基础护岸的变位模式及影响机制, 开展了土工离心模型试验及有限元模拟, 并提出了桶式基础护岸的变位分解计算方法。结果表明, 桶内回填阶段桶底土体被压缩, 桶体发生沉降变位; 陆侧回填阶段下桶陆侧上部及海侧土体被挤压, 桶体发生指向海侧的滑移变位以及指向陆侧的倾覆变位, 且转动中心位于桶底海侧并斜向上逐渐逼近桶体; 在深厚软土地基中针对桶周及桶底采用砂桩加固后, 能够有效提高竖向承载力、减小沉降量, 而对于侧向减载效果不明显。研究成果可以为桶式基础护岸的变位模式研究提供理论依据。

关键词: 桶式基础护岸; 深厚软土; 变位模式; 离心模型试验; 数值模拟

中图分类号: TU476 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2025)10-2056-10

作者简介: 潘卓杰(1996—), 男, 博士研究生, 主要从事海洋岩土工程方面的研究工作。E-mail: 210204010009@hhu.edu.cn。

Study on displacement mode of bucket foundation revetment in deep soft soil foundation

PAN Zhuojie^{1,2}, GUAN Yunfei¹, LI Wu³, HAN Xun¹, ZHANG Hongmei⁴

(1. Geotechnical Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China; 2. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, China; 3. CCCC Third Harbor Consultants Co., Ltd., Shanghai 200032, China; 4. Key Laboratory of Port, Waterway and Sedimentation Engineering of Ministry of Transport, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: Bucket foundation structures are commonly employed as breakwaters or revetments in deep soft soil foundations, particularly when used as bucket foundation revetments with complex backfill load conditions. To explore the displacement mode and the influencing mechanism of bucket foundation revetments under different stages of backfill loads, geotechnical centrifuge model tests and finite element simulations are carried out. Subsequently, a method for displacement decomposition calculation of bucket foundation revetments is proposed. The research findings reveal that during the backfilling process inside the bucket, the soil at the bucket bottom is compressed, resulting in a settlement-displacement mode of the bucket. During the land-side backfilling stage, the soil in the upper part of the land side and the sea side of the lower bucket is compressed. This causes the bucket to experience a sliding-displacement mode towards the sea side and an overturning-displacement mode towards the land side. The rotation center is located at the bucket bottom on the sea side and gradually moves towards the bucket in an oblique upward direction during the backfilling process. Reinforcing the soft soil foundation with sand piles around and at the bottom of the bucket can effectively enhance the vertical bearing capacity and reduce settlement. However, it is not effective for reducing lateral loads. The research results of this article can offer a theoretical basis for the study of the displacement mode of bucket foundation revetments.

Key words: bucket foundation revetment; deep soft soil; displacement mode; centrifugal model test; numerical analysis

基金项目: 国家自然科学基金项目(52271286); 国家重点研发计划项目(2023YFB2604200); 南京水利科学研究院创新团队基金项目(Y321008)
This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (52271286), the National Key Research and Development Program of China (2023YFB2604200), The Innovation team fund of Nanjing Hydraulic Research Institute (Y321008).

收稿日期(Received): 2024-09-26 修回日期(Revised): 2025-07-02 接受日期(Accepted): 2025-07-08 网络出版日期(Online): 2025-07-09

*通信作者(E-mail: yfguan@nhri.cn)

0 引 言

桶式基础结构是一种适用于离岸、深厚软基的新型港工结构, 由钢筋混凝土材料制成, 包括上部挡浪结构和下部椭圆形多隔仓基础桶, 可应对复杂海洋环境条件, 具备节能环保、安全经济的优点^[1-4]。目前该结构已应用于江苏连云港徐圩港区、上海洋山港小洋山港区, 作为防波堤和护岸的基础结构^[5-7]。

桶式基础结构作为防波堤时主要承受波浪循环荷载, 基本满足安全稳定要求^[8-12]。然而, 当桶式基础结构用作护岸时, 所承受的回填荷载远大于波浪荷载, 需重点研究其在回填荷载作用下的稳定情况, 可忽略波浪荷载的作用。对于桶式基础护岸的已有研究主要基于现场监测、模型试验和数值模拟等手段, 分析不同因素影响下结构特征点位的变化情况。陆侧回填材料影响了桶体的位移情况: 当回填淤泥时主要向海侧滑移^[13-17]; 当回填袋装砂时结构底部向海侧运动而顶部向陆侧运动^[14, 17]; 当回填块石时主要发生陆侧倾覆^[15, 18-19]。相关研究^[14-15]还表明当桶体嵌固深度范围内存在夹层或嵌固深度不足时会增大结构位移, 而地基土体强度较高时能够有效减小结构位移。除此之外, 还需考虑桶式基础护岸尺寸对其变形稳定的影响^[20-21], 当盖板尺寸较大且回填土体内摩擦角较大时, 作用在陆侧盖板上的力矩起主要作用将导致桶体向陆侧转动, 同时建议下桶长轴尺寸不应小于桶体高度以满足回填荷载作用下的稳定要求。综上, 目前针对桶式基础护岸的变位研究仅反映了多种变位模式叠加作用下的宏观表现。例如结构水平位移常选取上桶顶部或桶体中心进行描述, 结构沉降主要按照下桶点位变化进行描述, 而结构转动仅描述了转角变化情况, 未考虑结构变位分解后转动变位下的转动中心位置。因此, 需要针对桶式基础护岸结构特点提出一种合适变位分解计算方法, 明确不同因素共同作用下各单一变位模式的组合叠加情况。除此之外, 现有研究中缺乏面临深厚软基桶体无法贯穿的情况, 此时需对桶周、桶底地基进行处理, 结构变位模式存在其特殊性。

本文基于上海洋山港小洋山港区码头工程中应用的桶式基础护岸, 通过土工离心模型试验和有限元数值模拟计算, 分别提出了相应的结构变位分解计算方法。将桶体的宏观变位分解为单一变位模式, 主要包括滑移模式、沉降模式、倾覆模式, 并分析倾覆模式下转动中心的运动轨迹, 明确桶式基础护岸在回填荷载作用下各因素间的影响机制, 为桶式基础护岸工程在深厚软土地基中的建设提供参考。

1 工程概况

1.1 桶式基础结构

试验段护岸工程由多组桶式基础单元排列组成, 相邻桶体间距为 1 m。单个桶式基础结构由下部基础桶体和上部箱体组成, 如图 1 所示。下部基础桶体为椭圆形, 尺寸为 36.6 m×20 m×10 m (长×宽×高), 桶壁厚 400 mm, 盖板厚 500 mm, 桶内通过隔板划分 12 个隔仓, 隔板厚 300 mm, 下桶顶盖板标高-8.0 m, 桶底标高-18.0 m。上部箱体宽度为 13.6 m, 共分为 6 个隔仓, 隔仓高 11 m, 外墙壁厚 400 mm, 隔墙壁厚 300 mm, 上部箱体顶标高+3.0 m, 根据回填施工进度, 上部箱体顶部再接高 4 m, 最终顶部标高为+7.0 m。

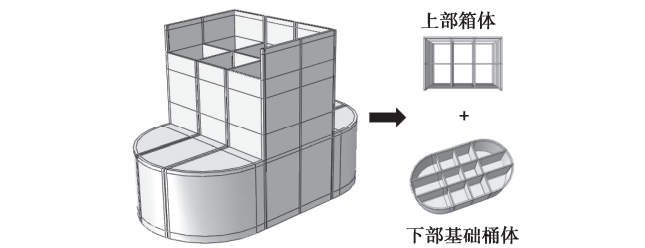


图 1 桶式基础结构

Fig. 1 Bucket foundation structure

1.2 水文地质条件

码头试验段设计低水位高程为+0.53 m, 天然地基泥面高程为-8.5 m。通过现场勘察可知工程区域地基自上而下依次为 (I) 淤泥质粉质黏土、(II) 黏土和 (III) 粉细砂, 其主要物理力学指标如下表 1 所示。

表 1 地基土主要物理力学性质指标

Table 1 Main physical and mechanical property indexes of soil layers

土层 标号	层 厚/ m	天然 含水 率/%	天然重度/ (kN·m ⁻³)	天然 孔隙 比	直剪固快		不排 水强 度/ kPa
					内摩 擦角/ (°)	黏聚 力/ kPa	
I	16.4	40.9	17.4	1.183	18.7	11.2	24.3
II	10.2	39.1	17.6	1.163	15.4	13.6	42.6
III	26.8	24.9	19.0	0.732	34.1	1.1	143.6

1.3 工程方案

施工工况剖面如下图 2 所示。

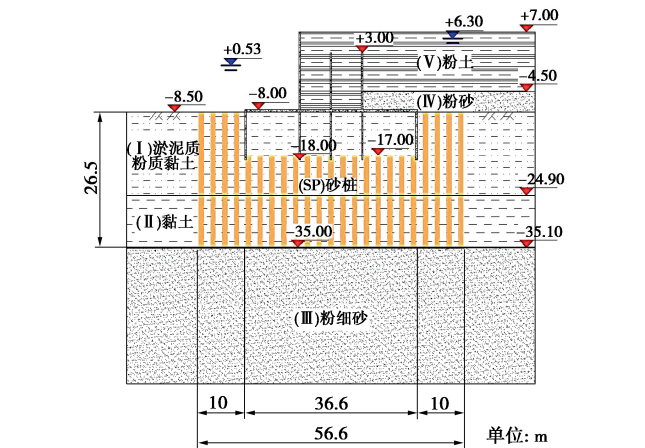


图 2 施工工况剖面图

Fig. 2 Construction condition profile

应力为原型的 $1/n$, 因此本试验各工况回填均在 $1g$ 条件下进行。回填完毕后旋转离心机逐级提高离心加速度以达到回填原型相应的应力状态, 且与试验回填对应的原型回填高度满足以下关系式:

$$H_{pt} = H_m \cdot \frac{a_{mt}}{ng} \quad (1)$$

式中: H_{pt} 为某一离心加速度下对应的原型回填高度 (m); H_m 为模型总回填高度 (mm); a_{mt} 为某一时刻的离心加速度 (m/s^2)。

同时根据相似率回填过程中离心机旋转时间与模拟原型时间具有以下关系:

$$T_p = T_m \cdot n^2 / (24 \times 60 \times 60) \quad (2)$$

式中: T_p 为模拟原型时间 (d); T_m 为离心机旋转时间 (s)。

各工况加速度上升过程可对应模拟原型回填施工期, 约 267 d, 而加速度保持恒定过程可对应模拟原型运营期, 约 409 d^[24]。整个试验过程中激光位移传感器测量的变位结果如图 5 所示。

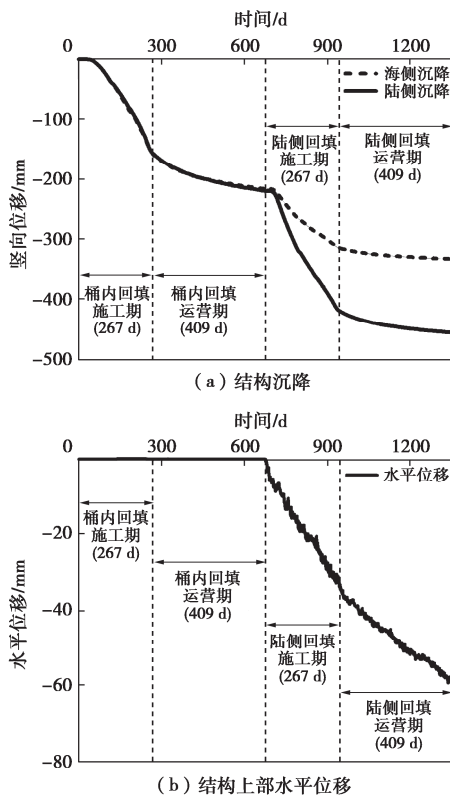


图 5 离心模型试验变位测量结果

Fig. 5 Displacement measurement results of a centrifugal model test

试验结果表明, 整个回填过程中结构主要发生沉降以及上部指向陆侧的水平位移, 且各阶段有所差异。受回填荷载作用位置和顺序以及填料性质差异的影响, 陆侧回填引起结构测点的沉降量小于桶内回填, 且测点的水平位移情况基本能满足回填稳定的要求。桶内回填阶段结构的位移以沉降为主, 最大沉降量为

156 mm, 而水平位移几乎为零。由于桶体对称, 桶内回填时荷载近似对称作用在结构上, 因此海陆侧沉降几乎一致。运行期桶体结构与下部地基土共同作用, 地基土在桶内荷载作用下引起土体固结沉降, 最终桶内回填阶段结构沉降稳定在约 218 mm。陆侧回填阶段结构受偏心荷载作用, 发生海陆沉降差以及上部指向陆侧的水平位移。在陆侧回填施工期, 当回填高度较小时结构海陆侧沉降发展较为均匀, 随着回填高度的增加结构陆侧沉降略大于海侧沉降, 且结构上部水平位移指向陆侧并持续增长, 回填至 +7.0 m 后, 桶顶水平位移达 -32 mm。随后, 在运行期陆侧回填荷载持续作用在下桶陆侧盖板以及地基土体上, 桶后地基土体进一步发生沉降变形, 导致海陆侧差异沉降明显增大, 结构上部水平位移持续发展, 此时结构下桶内隔仓与地基土相互作用以及桶内回填逐渐发挥了维持结构稳定的作用, 最终陆侧测点的累计沉降值约 455 mm, 海侧测点的累计沉降值约 333 mm, 而结构上部测点的累计水平位移仍指向陆侧达到了约 -60 mm。

3 有限元模型的建立与分析

3.1 参数选取及模型验证

结合实际工程情况, 采用有限元软件建立回填荷载作用下桶式基础护岸的稳定计算模型如图 6 所示。

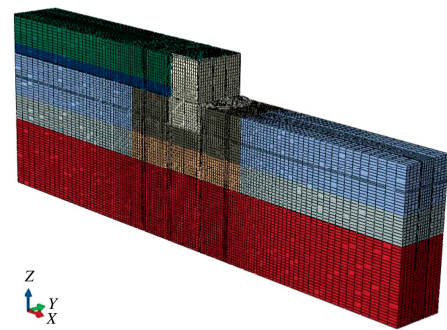


图 6 有限元计算模型

Fig. 6 Model of FEM

为消除边界效应, X 轴方向 (垂直结构轴线方向) 从桶式基础结构边缘向海陆两侧各延伸 85 m, 总长度为 200 m, X 轴正向指向海侧, 负向指向陆侧, Y 轴方向 (结构轴线方向) 跨度为 20 m, 即一个桶体所对应的宽度, Z 轴正向竖直向上, 整体模型侧面施加法向位移约束, 底面施加三向位移约束。计算网格采用六面体八节点单元 (C3D8I), 沿桶体高度方向进行结构化划分, 同时为提高计算效率靠近结构附近的网格进行加密。结构与土体的接触按照库仑摩擦计算, 法向采用硬接触, 即压力直接传递没有衰减, 切线设置罚函数。针对不同厚度的桶体开展下沉离心模型试验^[9],

表 4 南水模型计算参数

Table 4 Calculation parameters of Nanjing Hydraulic Research Institute (NHRI) double yield surface model

材料编号	材料名称	重度/ (kN·m ⁻³)	φ ₀ / (°)	R _f	K	n	c _d / %	n _d	R _d	泊松比 ν	Δφ/ (°)
I	淤泥质粉质黏土	17.40	29.40	0.53	27.70	0.78	5.09	0.24	0.53	0.41	4.60
II	黏土	17.60	35.30	0.57	78.70	0.52	1.83	0.42	0.55	0.42	7.80
III	粉细砂	19.00	45.10	0.83	311.00	0.77	0.21	1.16	0.70	0.31	9.90
IV	回填粉砂	18.00	41.30	0.68	180.00	0.55	0.88	0.59	0.63	0.36	5.80
V	回填粉土	17.40	36.60	0.58	54.90	0.73	3.83	0.23	0.58	0.41	9.90
SP	砂桩	18.50	36.00	0.74	480.00	0.43	0.30	1.10	0.68	0.30	2.00
SP-I	砂桩-淤泥质粉质黏土	17.79	32.97	0.60	54.49	0.66	3.41	0.54	0.58	0.37	3.25
SP-II	砂桩-黏土	17.92	35.58	0.63	118.00	0.49	1.29	0.66	0.60	0.379	5.50

对比分析计算得出穿越不同土层时桶式基础结构与黏性土之间接触面摩擦系数约为 0.206,与砂性土以及砂桩复合地基之间接触面摩擦系数约为 0.493。桶式基础护岸结构采用三维实体单元, C40 混凝土材料对应密度 $\rho = 2440 \text{ kg/m}^3$, 弹性模量 $E = 32.5 \text{ GPa}$, 泊松比 $\nu = 0.167$ 。地基土体和回填土体均采用南水双屈服面弹塑性本构模型, 按土体有效应力进行计算, 不考虑土体的排水固结过程。通过对原状土进行三轴压缩固结排水试验获取相应的南水模型参数, 且对于砂桩-地基土部分按等效复合地基参数计算^[25], 砂桩和各土体参数取值如表 4 所示。其中大气压强 P_a 取 101.3 kPa , 卸载时与加载时的弹模基数比值 K_{ur}/K 取 2。按照海陆侧各自的水位标准对水位以下部分采用浮重度进行计算。同时设置分析步依次为地应力平衡-桶内回填-陆侧回填。

取相近测点将离心试验结果与数模结果进行对比, 汇总于表 5。结果表明两者变化趋势一致且差异较小, 可验证所建立有限元模型及参数的准确性。

表 5 离心试验与数值模拟结果对比

Table 5 Comparison of centrifugal test and numerical simulation

工程阶段		试验结果/ mm	数模结果/ mm
桶内回填	海侧沉降	216.85	206.58
	陆侧沉降	220.21	206.62
桶内回填+陆侧回填	海侧沉降	332.87	312.76
	陆侧沉降	455.05	412.30
	水平位移	-59.58	-64.55

3.2 数值计算结果分析

图 7 给出了桶内回填阶段桶体的变位情况, 其中沉降为主要变位, 沉降量介于 203~208 mm, 且桶体中部沉降量略大于两侧, 而桶体水平位移量较小。而后继续进行陆侧回填桶体变位如图 8 所示。桶体两侧

出现沉降差, 最大沉降位于下桶陆侧前沿, 累计沉降量约 590 mm, 最小沉降位于下桶海侧前沿, 累计沉降量约 187 mm。桶体最大水平位移出现在上桶顶部约-130 mm 指向陆侧, 而下桶底部出现指向海侧的滑移约 147 mm。为进一步对比分析, 取桶体及附近计算单元, 将变位情况放大 10 倍绘制如图 9 所示的位移变化云图, 图中阴影部分为原始位置, 填充部分为相应阶段回填荷载作用后的位置。对比可知桶内回填阶段桶体主要发生沉降, 而后继续进行陆侧回填桶体产生了沉降以及指向海侧的水平位移, 同时由于回填粉砂及粉土的侧向土压力系数相对较小, 作用在桶后陆侧盖板上产生的力矩大于作用在上桶陆侧产生的力矩, 因此还伴随着指向陆侧的转动。

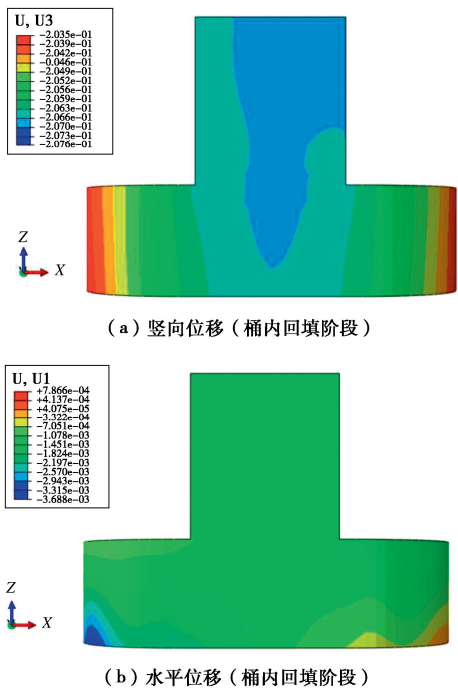


图 7 桶内回填阶段桶体变位

Fig. 7 Displacement contour of bucket during backfilling inside bucket

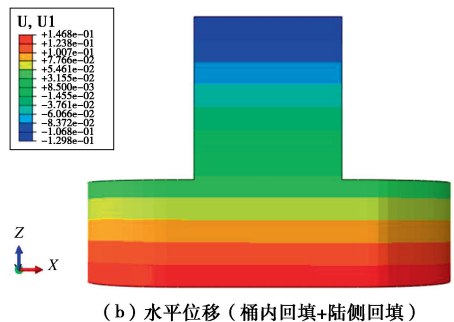
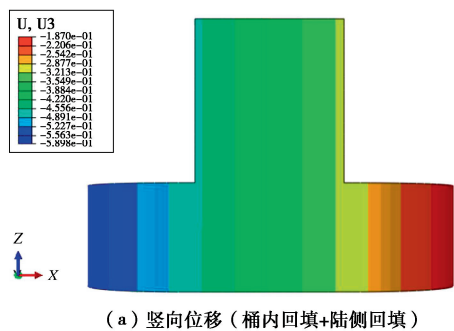


图 8 桶内回填+陆侧回填阶段桶体变位
Fig. 8 Bucket body displacement contour during stage of backfilling inside bucket & backfilling on land side

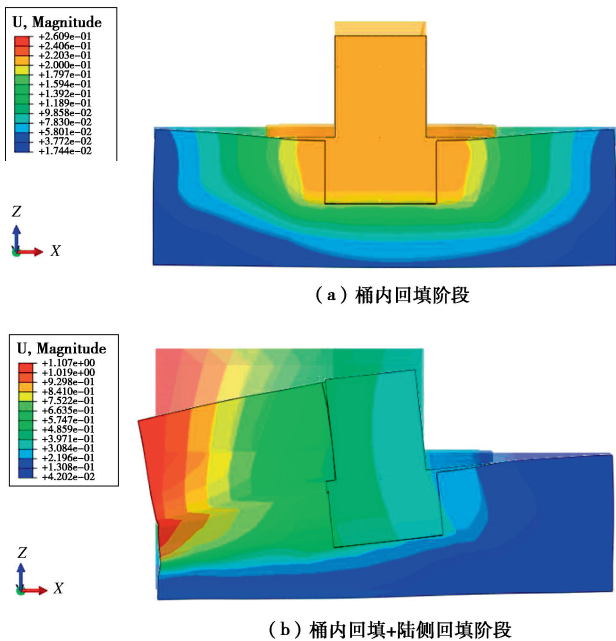


图 9 位移变化云图
Fig. 9 Displacement nephogram

4 单侧回填下桶式基础护岸的变位模式分析

4.1 桶式基础结构变位分解计算方法

取上桶海侧端点 O 为原点, 规定指向的陆侧水平方向为 X 轴正向, 竖直向下为 Z 轴正向, 指向陆侧的转角 θ 为正, 建立平面直角坐标系如图 10 所示。

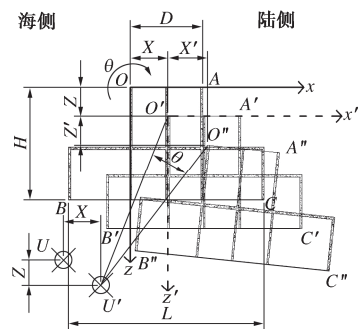


图 10 结构变位分析图

Fig. 10 Analysis of structural displacement

由于结构刚度远大于土体, 因此将桶体视为刚体进行分析, 将其变位分解为平动和转动, 各点坐标变化如下表 6 所示。由初始位置 $OABC$ 经过平动至 $O'A'B'C'$ 位置, 将结构沿水平方向平动产生的位移记为 X , 沿竖直方向平动产生的位移记为 Z 。而后转动至 $O''A''B''C''$ 位置, 相应转动中心标记为 U 点。

表 6 各点坐标变化情况

Table 6 Changes in coordinates of each point

点	$OABC$	$O'A'B'C'$	$O''A''B''C''$
O	$(0,0)$	(X,Z)	(a,b)
A	$(D,0)$	$(X+D,Z)$	(m,n)
B	$((D-L)/2,H)$	$(X+(D-L)/2,Z+H)$	(r,s)
C	$((D+L)/2,H)$	$(X+(D+L)/2,Z+H)$	(α,β)
U	(i,j)		(p,q)

(1) 当采用数值模拟进行研究时, 任一瞬时 $O''(a,b)$ 的坐标、 $A''(m,n)$ 的坐标、 $B''(r,s)$ 的坐标、 $C''(\alpha,\beta)$ 的坐标、上桶外径 D 、下桶长轴 L 和桶体高度 H 均为已知参数, 据此可求解结构整体变位如下:

a) 结构转角 θ : $O''A''$ 与水平方向夹角, 满足

$$\theta = \arctan\left(\frac{n-b}{m-a}\right) \quad (3)$$

b) 结构水平位移 X : 由于回填荷载作用于陆侧, 其对于上桶侧壁的荷载分量 F_1 指向海侧即 X 轴负向。因此, 结构水平位移 X 按与该方向一致的各动点非零最小负水平位移量选取且不应大于上一阶段的水平位移, 否则 $X=0$, 即第 i 阶段的水平变位, 满足

$$X_i = \begin{cases} -\min\{k_i\} & (\exists k_i < 0, k_i < X_{i-1}) \\ X_{i-1} & (\exists X_{i-1} < k_i < 0) \\ 0 & (\forall k_i \geq 0) \end{cases} \quad (4)$$

其中 $k_i = a_i, m_i - D_i, r_i - (D_i - L_i)/2$ 或 $\alpha_i - (D_i + L_i)/2 (i=1, 2, \dots)$, 且 $X_0=0$ 。

c) 结构竖向位移 Z : 由于回填荷载作用于陆侧, 其对于盖板的荷载分量 F_6 竖直向下即 Z 轴正向。因此, 结构竖向位移 Z 按与该方向一致的各动点非零最小正竖向位移量选取且不应小于上一阶段的竖向位移, 否则 $Z=0$, 即第 i 阶段的竖向变位满足

$$Z_i = \begin{cases} \min\{f_i\} & (\exists f_i > 0, f_i > Z_{i-1}) \\ Z_{i-1} & (\exists 0 < f_i < Z_{i-1}) \\ 0 & (\forall f_i \leq 0) \end{cases} \quad (5)$$

式中: $f_i = b_i, n_i, s_i - H_i$ 或 $\beta_i - H_i$ ($i=1, 2, \dots$), 且 $Z_0=0$ 。

d) 转动中心坐标(i, j): 定系 XOZ 的转动中心位置为 $U(i, j)$ 与动系 $X'O'Z'$ 的转动中心 $U'(p, q)$ 满足

$$i = p - X, \quad (6)$$

$$j = q - Z. \quad (7)$$

以 O 和 A 点为参照进一步分析其运动情况, 由几何关系可知: ① $U'O' = U'O''$; ② $U'A' = U'A''$, 即

$$(p-X)^2 + (q-Z)^2 = (p-a)^2 + (q-b)^2, \quad (8)$$

$$(p-D-X)^2 + (q-Z)^2 = (p-m)^2 + (q-n)^2. \quad (9)$$

当结构存在一定转动时(即 $|\theta| \geq 0.05^\circ$) 可联立式(6)~(9) 计算结构转动中心 $U(i, j)$, 其坐标满足:

$$i = \left\{ (n-Z) \left[(a-X)^2 + b^2 \right] - (b-Z) \cdot \left[(m-X)^2 + n^2 - D^2 \right] + (b-n)Z^2 \right\} / \left[(D+X-m)(b-Z) + (a-X)(n-Z) \right], \quad (10)$$

$$j = \left\{ (D+X-m) \left[a^2 + (b-Z)^2 - X^2 \right] + (a-X) \left[m^2 + (n-Z)^2 - (D+X)^2 \right] \right\} / \left[(D+X-m)(b-Z) + (a-X)(n-Z) \right]. \quad (11)$$

(2) 当采用离心试验进行研究时, 任一瞬时水平位移测值变化量 d 、海侧竖向位移测值变化量 S_1 、陆侧竖向位移测值变化量 S_2 , 同时上桶外径 D 、下桶长轴 L 、桶体高度 H 、激光 S_1 到海侧端点 O 的距离 d_0 、竖向位移测点水平间距 d_1 、水平位移测点距离初始位置的上桶顶部高度 h 均为已知参数, 如图 11 所示。

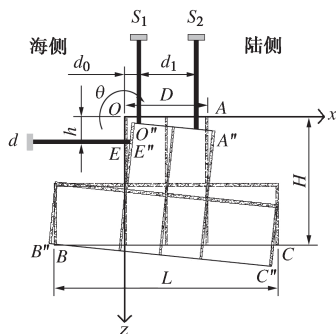


图 11 离心试验激光测量分析图

Fig.11 Analysis of laser measurement in centrifugal test

a) 结构转角 θ : 可按式(12) 进行计算

$$\theta = \arctan \left(\frac{S_2 - S_1}{d_1} \right). \quad (12)$$

b) 结构水平位移 X : 对应动点的 X 轴坐标满足

$$a = \frac{(h - S_1) \tan \theta + d_0 \cdot \tan^2 \theta + d}{1 + \tan^2 \theta}, \quad (13)$$

$$m = a + D \cos \theta, \quad (14)$$

$$r = a - H \sin \theta - \left(\frac{L-D}{2} \right) \cos \theta, \quad (15)$$

$$\alpha = a - H \sin \theta + \left(\frac{L+D}{2} \right) \cos \theta. \quad (16)$$

将上式(12)~(16) 的计算结果代入式(4) 中进行判别计算可得结构水平位移 X 。

c) 结构竖向位移 Z : 对应动点的 Z 轴坐标满足

$$b = \frac{(d - d_0) \tan \theta + h \cdot \tan^2 \theta + S_1}{1 + \tan^2 \theta}, \quad (17)$$

$$n = b + D \sin \theta, \quad (18)$$

$$s = b + H \cos \theta - \left(\frac{L-D}{2} \right) \sin \theta, \quad (19)$$

$$\beta = b + H \cos \theta + \left(\frac{L+D}{2} \right) \sin \theta. \quad (20)$$

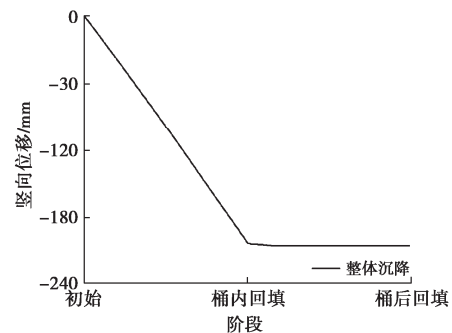
将式(12), 式(17)~(20) 的计算结果代入式(5) 中进行判别计算可得结构竖向位移 Z 。

d) 转动中心坐标(i, j): 可将上述位移 X, Z 以及点 O'' 和点 A'' 的坐标分别代入式(10), (11) 中并结合已知参数求解。

4.2 桶式基础护岸的结构变位模式分析

基于上述方法分解计算数模的变位如图 12 所示。其中各点均为有限元计算过程中荷载从零逐渐增加至设定值, 变位不断迭代产生的稳定结果。对比分析可知桶内回填阶段桶体主要发生沉降变位, 沉降值约 203.56 mm, 该阶段几乎无水平位移和转角。陆侧回填阶段桶体变位包括竖向位移、水平位移以及转动, 且沉降变化速率明显小于桶内回填阶段并趋于稳定, 最终结构下沉总竖向位移为 -205.93 mm, 同时向海侧滑移 141.79 mm, 向陆侧的偏转角约为 -0.63° 。

针对陆侧回填阶段桶体转动, 计算其转动中心变化情况并绘制运动轨迹如下图 13 所示。其中坐标为桶体沿长轴方向剖面处的平面直角坐标系。分析可知转动中心位于桶体以下海侧方向, 随着陆侧回填荷载的作用从 S 开始逐渐向 E 方向移动, 即运动轨迹沿斜上方逐渐逼近桶体并趋于水平, 且运动幅度逐渐减小, 最终停留在点 (19.70, -50.15) 处。



(a) 结构整体沉降

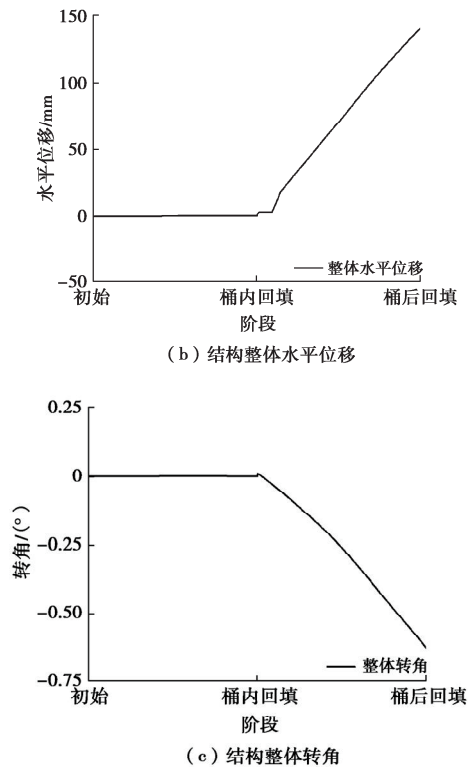


图 12 各阶段桶体变位

Fig. 12 Displacement of bucket in each stage

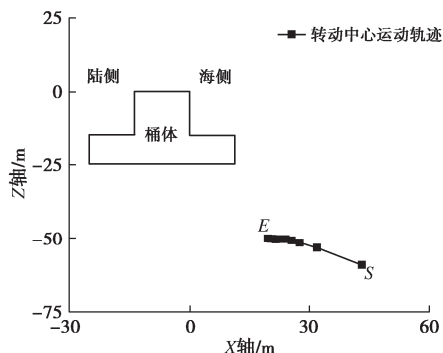


图 13 转动中心运动轨迹

Fig. 13 Rotation center motion trajectory

综上,桶内回填阶段桶体的变位模式为沉降变位,而陆侧回填阶段桶体变位模式主要为倾覆变位和滑移变位,伴随较小的沉降变位,最终结构趋于稳定。

4.3 单侧回填作用下桶式基础护岸的变位影响机制

针对桶内回填阶段地基土体应变发展情况进行分析,绘制应变云图如图 14 所示。桶内回填初始阶段下桶底部与隔板接触部位土体产生压缩变形,而后逐渐发展向深处及远处扩散。最大压缩变形发生在桶体底部以下 1 m 位置(即砂桩-淤泥层内)处,应变值约 -2.65%,而后随深度增加土体应变逐渐减小,在桶底向下约 6.9 m 位置(即砂桩-淤泥质粉质黏土与砂桩-黏土交界面)处降至约 -1.09%,同时沿水平方向桶体前后约 23 m 范围内土体受影响较大。

而后继续进行陆侧回填,土体应变如图 15 所示。

结果表明,陆侧地基上部淤泥质粉质黏土层被压缩,平均压缩应变约 -16.76%,且受桶体转动挤压的影响下桶后方陆侧上部的地基土体中出现最大累计应变约 -29.92%。桶底土体应变值相比于上一阶段略有增加,且陆侧桶底应变明显大于海侧桶底应变,即该阶段桶体整体沉降较小,主要发生指向港池侧的偏转。除此之外,回填荷载对桶体上部侧壁的直接作用以及对下桶陆侧侧壁的间接作用导致下桶前沿海侧土体被挤压,应变值大于陆侧,即桶体存在指向海侧的滑移。

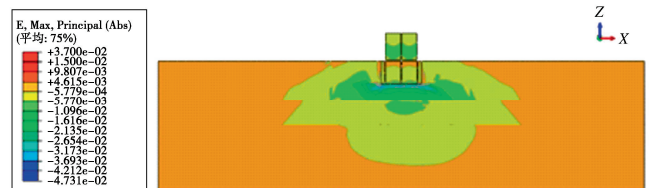


图 14 桶内回填阶段土体应变等值线图

Fig. 14 Contour of soil strain during backfilling inside bucket

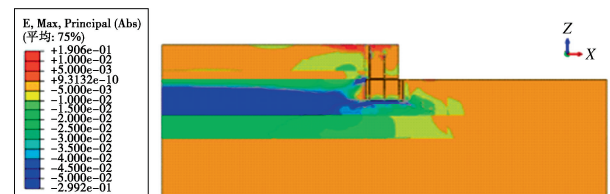


图 15 桶内回填+陆侧回填阶段土体应变等值线图

Fig. 15 Contour of soil strain during backfilling inside bucket & backfilling on land side

综上,桶内回填阶段上桶内回填荷载主要为对称竖向荷载,导致桶体盖板以及下桶侧壁、隔板与周围土体充分接触,封闭在隔仓内的淤泥质粉质黏土由于变形模量小,因此其竖向荷载分担比例较小。桶内回填的竖向荷载主要作用在桶体底部及桶周的砂桩-淤泥质粉质黏土层内并向远深处传递,尤其桶体下部出现较大的压缩变形并随着深度的增加逐渐减小,宏观上表现为桶体的沉降变位模式。陆侧回填阶段回填荷载对于桶体的作用需要根据分解后的不同变位模式具体分析。一方面,当陆侧回填时桶后未加固地基土体在回填荷载的直接作用下首先发生沉降变形,导致下桶陆侧土体处于被动压缩状态,对陆侧下桶侧壁产生较大推力,与直接作用在上桶侧壁的回填荷载共同作用,导致结构整体发生指向海侧的水平位移,即结构变位模式包含指向海侧的滑移。另一方面,由于桶后陆侧盖板在竖直方向上受到回填偏心荷载的直接作用,产生较大偏转力矩,与作用在上桶侧壁荷载产生的力矩相抗衡,当回填荷载对陆侧盖板产生的力矩起主导作用时,将导致桶体出现指向陆侧的转动,此时桶后陆侧以及桶前海侧下部土体将被挤压,尤其下桶陆侧上部土体发生较大变形,即结构变位模式包含指向陆侧的倾覆。除此之外,本工程中桶周及桶底地基

经砂桩复合地基加固,且桶内回填阶段地基土已发生较大沉降,因此陆侧回填时桶底土体无明显压缩变形,即结构变位模式包含较小的沉降。最终宏观上陆侧回填阶段桶体的变位模式为上述3种变位的叠加,主要为指向海侧的滑移变位以及指向陆侧的倾覆变位,同时也可以进一步说明采用砂桩加固的方式进行地基处理可以较好地提高地基承载力以减小沉降量,但对于侧向减载能力有待进一步提升。

5 结 论

本文基于上海洋山港桶式基础护岸工程进行了离心模型试验和数值模拟研究,提出了结构变位分解计算方法并进行变位模式分析,主要得出以下5点结论。

(1)提出的桶式基础结构变位分解计算方法可基于离心试验或数值模拟将宏观组合变位定量分解为水平位移、沉降和转动,明确转动中心位置及运动轨迹,为失稳机理研究提供理论基础。

(2)桶内回填阶段桶式基础护岸的变位主要受桶底地基土体强度以及回填荷载的影响。当桶土接触时产生的竖向抗力不足或桶内回填荷载较大时,桶底土体将不断被压缩,宏观上结构表现为沉降变位模式。

(3)陆侧回填阶段桶式基础护岸的变位主要受回填材料、地基土体强度等多种因素的影响,存在不同变位模式的组合叠加。在陆侧回填荷载作用下,当桶底土体具备较高承载力时,桶周土体将发生较大变形,宏观上结构的变位模式主要包括倾覆以及滑移。

(4)当陆侧回填导致桶体发生陆侧倾覆时,转动中心位于桶底下部海侧,随回填荷载增加沿斜上方逐渐逼近桶体,且运动幅度逐渐减小最终趋于稳定。

(5)桶周采用砂桩加固深厚软基可较好地提高竖向承载力减小结构沉降,但侧向减载效果提高不明显。当回填荷载较大时建议增加结构进入持力层的深度,同时增加陆侧地基处理范围以减小结构变位。

利益冲突声明/Conflict of Interests: 所有作者声明不存在利益冲突。All authors disclose no relevant conflict of interest.

作者贡献/Authors' Contributions: 潘卓杰和关云飞设计研究内容,关云飞提供研究指导,潘卓杰完成试验、计算及分析,李武提供工程资料,韩迅提供计算参数,张红梅协助完成试验,潘卓杰、关云飞参与论文的写作和修改。所有作者均阅读并同意最终稿件的提交。This study was designed by PAN Zhuojie and GUAN Yunfei and supervised by GUAN Yunfei. The experiment, calculation, and analysis were completed by Pan Zhuojie. The engineering data was provided by LI Wu. The numerical simulation calculation parameters were provided by HAN Xun. The experiment was completed with the assistance of

ZHANG Hongmei. The manuscript was drafted and revised by PAN Zhuojie and GUAN Yunfei. All the authors have read the last version of paper and consented for submission.

参考文献:

- [1] 李 武, 程泽坤. 淤泥质海岸桶式结构设计[J]. 水运工程, 2015(1): 42-47. (LI Wu, CHENG Zekun. Design of bucket-based structure on silt coast[J]. Port & Waterway Engineering, 2015(1): 42-47. (in Chinese))
- [2] PANG Q X. Key parameters of breakwater layout in muddy port of Lianyungang[J]. International Journal of Engineering and Technology, 2017, 9(4): 341-345.
- [3] LIU Z G, SCHINDLER S, LIU W D. Demystifying Chinese overseas investment in infrastructure: Port development, the Belt and Road Initiative and regional development[J]. Journal of Transport Geography, 2020, 87: 102812.
- [4] CHENG J N, LIAN F, YANG Z Z. The impacts of port governance reform on port competition in China[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2022, 160: 102660.
- [5] 陈浩群, 李 武. 新型结构在连云港港口工程中的应用[J]. 水运工程, 2013(10): 83-88. (CHEN Haoqun, LI Wu. Application of new hydraulic structure in Lianyungang port engineering[J]. Port & Waterway Engineering, 2013(10): 83-88. (in Chinese))
- [6] 沈雪松, 程泽坤. 桶式基础结构应用技术与实践[M]. 南京: 河海大学出版社, 2016. (SHEN Xuesong, CHENG Zekun. Application Technology and Practice of Bucket Foundation Structure[M]. Nanjing: Hohai University Press, 2016. (in Chinese))
- [7] 沈雪松, 蔡正银, 关云飞. 新型桶式基础结构关键技术研究[M]. 北京: 科学出版社, 2017. (SHEN Xuesong, CAI Zhengyin, GUAN Yunfei. Research on Key Technologies of New Bucket Foundation Structure[M]. Beijing: Science Press, 2017. (in Chinese))
- [8] 杨立功, 蔡正银. 沉入式桶式基础防波堤抗倾覆稳定性计算[J]. 水利水运工程学报, 2015(4): 61-68. (YANG Ligong, CAI Zhengyin. A computation method for stability against overturning of embedded bucket foundation breakwater[J]. Hydro-Science and Engineering, 2015(4): 61-68. (in Chinese))
- [9] 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 Zhengyin, YANG Ligong, 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))
- [10] 关云飞, 曹永勇, 李文轩. 桶式基础防波堤工作特性原位试验研究[J]. 中国港湾建设, 2016, **36**(12): 23-28. (GUAN Yunfei, CAO Yongyong, LI Wenxuan. In-situ study on working characteristic of bucket foundation breakwater[J]. China Harbour Engineering, 2016, **36**(12): 23-28. (in Chinese))
- [11] 魏冰, 蔡正银. 桶式结构特性研究[J]. 中国港湾建设, 2016, **36**(3): 26-30, 35. (WEI Bing, CAI Zhengyin. Characteristic research of bucket-based structure[J]. China Harbour Engineering, 2016, **36**(3): 26-30, 35. (in Chinese))
- [12] 曹永勇. 离岸多隔舱钢桶基础下沉和顶升原位试验[J]. 岩土工程学报, 2020, **42**(增刊 1): 219-223. (CAO Yongyong. In-situ tests on sinking and lifting on offshore steel-bucket foundation with multi-bay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, **42**(S1): 219-223. (in Chinese))
- [13] 丁文强, 张东明, 黄宏伟, 等. 新型桶式驳岸基础结构施工及运营期数值模拟分析研究[J]. 水利学报, 2015, **46**(增刊 1): 343-348. (DING Wenqiang, ZHANG Dongming, HUANG Hongwei, et al. Numerical study on the new bucket revetment foundation in the stages of construction and operation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, **46**(S1): 343-348. (in Chinese))
- [14] 聂琴, 魏冰, 李武. 软土地基上桶式驳岸稳定性离心模型试验研究[J]. 中国港湾建设, 2016, **36**(1): 37-41. (NIE Qin, WEI Bing, LI Wu. Centrifugal model test of bucket-based revetment stability on soft soil foundation[J]. China Harbour Engineering, 2016, **36**(1): 37-41. (in Chinese))
- [15] 聂琴, 李立, 李武. 回填材料对桶式基础结构驳岸的影响分析[J]. 中国港湾建设, 2019, **39**(增刊 1): 91-95. (NIE Qin, LI Li, LI Wu. Influence analysis of backfilling material on bucket-based structure revetment[J]. China Harbour Engineering, 2019, **39**(S1): 91-95. (in Chinese))
- [16] 曹耀中, 姚文娟, 程泽坤. 吹填淤泥下桶式基础结构土压力及位移分析[J]. 上海大学学报(自然科学版), 2019, **25**(2): 328-336. (CAO Yaozhong, YAO Wenjuan, CHENG Zekun. Analysis of soil pressure and displacement on bucket-based structure under reclamation silt[J]. Journal of Shanghai University (Natural Science Edition), 2019, **25**(2): 328-336. (in Chinese))
- [17] 韩迅, 王墨璠, 武颖利. 回填荷载下桶式基础护岸变形与稳定数值分析[J]. 岩土工程学报, 2021, **43**(增刊 2): 88-91. (HAN Xun, WANG Mofan, WU Yingli. Numerical analysis of deformation and stability of bucket foundation revetment under backfill load[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, **43**(S2): 88-91. (in Chinese))
- [18] 赵妍, 陈海峰. 桶式结构单边加载设计及试验研究[J]. 中国港湾建设, 2016, **36**(3): 45-48. (ZHAO Yan, CHEN Haifeng. Unilateral loading design and test research of bucket-based structure[J]. China Harbour Engineering, 2016, **36**(3): 45-48. (in Chinese))
- [19] 郑炜, 孙洋波, 石鑫, 等. 单侧抛石回填下桶式结构监测分析[J]. 水运工程, 2018(2): 57-61, 80. (ZHENG Wei, SUN Yangbo, SHI Xin, et al. Unilateral riprap loading monitoring analysis of bucket-based structure construction[J]. Port & Waterway Engineering, 2018(2): 57-61, 80. (in Chinese))
- [20] ZHANG X Y, GUI J S. Study on stability of bucket foundation under backfill[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2018, **189**(4): 042019.
- [21] 刘俊锋. 基于 ABAQUS 的桶式基础结构尺寸优化: 以连云港港为例[D]. 大连: 大连海洋大学, 2023. (LIU Junfeng. BAQUS-Based Barrel Infrastructure Size Optimization: A Case Study of Lianyungang Port[D]. Dalian: Dalian Ocean University, 2023. (in Chinese))
- [22] 徐光明, 王年香, 顾行文, 等. 模型箱约束对大变形破坏离心模型试验影响初探[J]. 岩土工程学报, 2023, **45**(2): 232-242. (XU Guangming, WANG Nianxiang, GU Xingwen, et al. Preliminary study on influences of model container constraint on large-deformation failure behaviors by centrifuge modeling[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, **45**(2): 232-242. (in Chinese))
- [23] 港口工程离心模型试验技术规程: JTS/T 231—7—2013[S]. 北京: 人民交通出版社, 2014. (Code for Centrifugal Model Test for Port Engineering: JTS/T 231—7—2013[S]. Beijing: China Communications Press, 2014. (in Chinese))
- [24] 徐超, 贾斌, 罗玉珊, 等. 圬工与加筋土组合式挡墙离心模型试验[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2015, **43**(3): 379-385. (XU Chao, JIA Bin, LUO Yushan, et al. Centrifuge model tests of behavior of masonry and reinforced soil composite retaining wall[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2015, **43**(3): 379-385. (in Chinese))
- [25] 李阳. 碎石桩复合地基多尺度力学分析方法研究[D]. 北京: 清华大学, 2018. (LI Yang. Study on Multiscale Mechanical Analysis Method of Stone-Column Composite Foundations[D]. Beijing: Tsinghua University, 2018. (in Chinese))