

DOI: 10.11779/CJGE202004006

黏土中箱筒型基础防波堤静力失稳破坏模式和承载力研究

蒋敏敏¹, 蔡正银², 肖昭然¹, 徐光明²

(1. 河南工业大学土木工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 南京水利科学研究院岩土工程研究所, 江苏 南京 210024)

摘要: 箱筒型基础结构是适用于软土、大波浪荷载的新型防波堤结构。通过离心试验研究了箱筒型基础结构的静力失稳破坏模式和承载力特性, 以及地基土体强度、波浪力作用高度对其影响规律。研究表明, 箱筒型基础结构的荷载与转角、水平位移和竖向位移关系曲线有弹性变位和失稳破坏两阶段, 但土体强度较大时, 竖向位移不出现失稳破坏。随着弯矩的增大, 结构转动中心从海床面以上向地基中移动, 达到弯矩承载力时, 转动中心深度位于桶底端附近。土体强度较小、波浪力作用高度较低, 结构失稳的变位模式为转动和竖向位移; 波浪力作用高度增大, 失稳的变位模式为转动、水平位移和竖向位移的模式; 土体强度增大至 44.5 kPa, 变位模式为转动和水平位移的模式。土体强度相同时, 结构的弯矩承载力随着水平承载力的增大呈线性降低; 波浪力作用高度相同时, 弯矩承载力随着水平承载力的增大呈线性增长关系。研究结果揭示了箱筒型基础结构失稳破坏规律和承载力特性, 并为结构优化设计提供参考。

关键词: 箱筒型基础防波堤; 黏土地基; 离心模型试验; 失稳破坏模式; 承载力

中图分类号: TU442; U656 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2020)04-0642-08

作者简介: 蒋敏敏(1981—), 男, 博士, 副教授, 主要从事土与结构相互作用等方面的教学和科研工作。E-mail: jiangmminhaut@126.com。

Failure modes and bearing capacity of composite bucket foundation breakwater in clay

JIANG Min-min¹, CAI Zheng-yin², XIAO Zhao-ran¹, XU Guang-ming²

(1. College of Civil Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China; 2. Geotechnical Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China)

Abstract: Composite bucket foundation breakwater is a new structure applicable for soft clay and large wave load conditions. A series of centrifuge tests are conducted to study the failure modes and bearing capacity of the structure as well as the effects of undrained strength of soils and load eccentricity. Main conclusions are as follows: the load-displacement curves for rotation angle, horizontal displacement and vertical displacement can be divided into elastic displacement stage and failure stage, except when the undrained strength of soils is 44.5 kPa, the failure stage of vertical displacement does not appear. With the increase of moment load, the rotation center moves downward below seabed level, and as the moment load reaches bearing capacity, the rotation center is located at bucket tip. When the undrained strength of soils and load eccentricity is low, the structure has a rotational and vertical displacement mode. As the load eccentricity increases to 10.5 m and 13.5 m, the displacement mode converts to a combination of rotational, horizontal and vertical displacements. As the undrained strength of soils increases to 44.5 kPa, the displacement mode converts to a combination of rotational and horizontal displacements. Under the same undrained strength of soils, the bearing capacity of the moment decreases linearly with the increase of the bearing capacity of horizontal load. Under the same load eccentricity, the bearing capacity of the moment increases linearly with the increase of the bearing capacity of horizontal load. The results reveal the failure mode and bearing capacity of the composite bucket foundation breakwater, and provides reference for the optimal design of the structure.

Key words: composite bucket foundation breakwater; clay foundation; centrifugal model test; failure mode; bearing capacity

0 引言

防波堤是用于阻挡波浪侵袭、保证海港内设施安

基金项目: 国家自然科学基金项目(51408197, 51879167, 51179105);
国家重点研发计划项目(2016YFC0405100)
收稿日期: 2019-08-14

全的重要建筑物, 常规的防波堤有沉箱结构、复合式结构和半圆形结构等结构形式^[1-2]。然而在遇到软土地基、深水、大波浪荷载等复杂条件时, 常规防波堤结构可能不再适用, 结构失稳破坏的现象时有发生^[3-4]。针对上述问题, 国内近年开始应用新型的箱筒型基础防波堤结构^[5-7]。该结构由基础和上部挡浪墙组成, 基础部分通常由4个圆桶通过连接墙和盖板组成整体, 依靠复杂的结构与土相互作用抵御风暴波浪作用。

目前国内外对于单桶基础已有较多的研究。在承载力方面, 张金来等^[8]、Bransby等^[9]、Wang等^[10]、黎冰等^[11]通过数值模拟、离心试验以及理论推导, 研究了桶基尺寸、长径比、埋深、土层性质对单桶基础水平、竖向和弯矩承载力的影响; 并考虑土压力、摩擦力的发挥过程以及环向各点土压力大小的不同, 基于极限平衡法提出了承载力计算方法。在破坏机理方面, Liu等^[12]、刘润等^[13]、范庆来等^[14]通过数值模拟研究了单桶基础在V-H-T空间的屈服面, 以及破坏模式; Zhang等^[15]通过离心试验提出单桶基础的动力破坏形式包括地基动液化和长期动荷载引起的结构沉降两种形式。在结构变位方面, Zhu等^[16]、Cox等^[17]通过模型试验得出了长期循环荷载作用下单桶基础倾角、沉降的计算公式。

在三桶基础和箱筒型基础的研究方面。Kim等^[18]提出三桶基础相对于单桶基础具有较大的刚度, 并得出了三桶基础承载力和群桶效应系数的规律。蔡正银等^[5]通过数值模拟提出箱筒型基础结构在下沉过程中, 筒壁周边存在着下沉、相对隆起和下压变形区, 并分析了挤土效应对稳定性的影响。杨立功等^[19]、王元战等^[20]通过数值法研究了波浪力作用下, 筒壁上主动、被动、静止土压力以及正负摩阻力的分布范围, 并提出了土压力简化计算法。肖忠等^[6]、蒋敏敏等^[7]通过数值模拟、离心试验等方法对天津港软土层中箱筒型基础结构的失稳和承载特性进行了研究。肖忠等^[21-22]基于极限平衡法和数值模拟, 提出了箱筒型基础结构稳定性分析计算法。

中国沿海广泛分布了黏土地基, 港口工程的发展必然要求建设大量防波堤, 箱筒型基础防波堤结构已经在天津、连云港等港口工程中得以应用, 并初步显现出对于软黏土、大波浪荷载条件的适应性^[5-7]。然而现有的关于桶形基础的研究主要集中于单桶基础、三桶基础, 箱筒型基础结构的基础部分相比于以往的结构具有更多的分隔部分, 复杂的结构与土相互作用, 必然导致其破坏模式和承载特性与单桶基础、三桶基础不同。部分针对箱筒型基础结构的研究主要集中于土压力、稳定性的数值研究, 对失稳破坏模式和承载特性的试验研究仍不足。本文针对天津港箱筒型基础

防波堤, 在离心试验中对结构施加不同的水平力和弯矩组合, 研究地基土体强度、波浪力作用高度等因素影响下, 箱筒型基础结构的静力失稳破坏模式和承载力等性质, 为结构优化设计提供参考和依据。

1 试验设计

1.1 试验设备和试验装置

本试验在南京水利科学研究院50 g·t臂式离心机中进行, 最大有效半径为2.5 m, 最高加速度250g, 相应的最大负载为200 kg。模型箱净空尺寸的长、宽、高为685, 350, 450 mm。

采用自行研制的离心机水平静力加载设备^[7]对箱筒型基础结构施加波浪力, 该设备由电机、齿轮箱、导向支座和荷重传感器构成, 如图1所示。该设备以等应变速率对防波堤施加静推力, 推力最大值为15 kN(在原型尺度达165 MN), 同时通过导向支座, 避免传力杆在离心超重力场中产生过大挠曲。

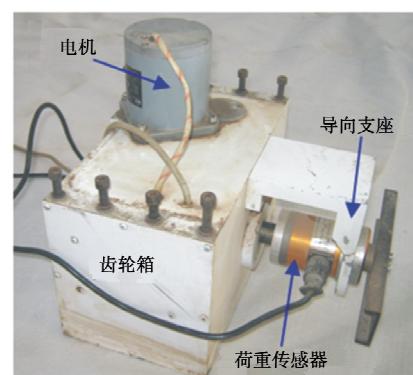


图1 离心试验静力加载设备

Fig. 1 Static loading devices in centrifuge tests

1.2 箱筒型基础结构和地基土体的模拟

箱筒型基础防波堤为钢筋混凝土结构, 由箱筒型基础和上部挡浪墙组成, 箱筒型基础由4个圆桶通过连接墙连成整体, 基础圆桶的上面为盖板, 盖板以上为圆桶形挡浪墙。基础圆桶直径为12 m、高度9 m、壁厚0.3 m, 盖板边长27 m、厚度0.5 m, 上部圆桶形挡浪墙的直径为12 m。

模型箱筒型基础结构采用铝合金制作, 根据离心试验相似原理结构尺寸缩小为原型的1/N, N为离心试验比尺, 本试验中设为105。箱筒型基础结构的桶壁受地基土压力和摩阻力作用, 为受弯结构^[5,19], 在本研究中根据抗弯刚度相似原理设计桶壁的厚度^[23]为

$$t_m = \frac{t_p}{N} \sqrt[3]{E_p/E_m} \quad , \quad (1)$$

式中, t_m 和 t_p 分别为模型和原型结构的壁厚, E_m 和 E_p 分别为模型和原型材料的弹性模量。模型箱筒型基

础防波堤结构如图 2 所示。

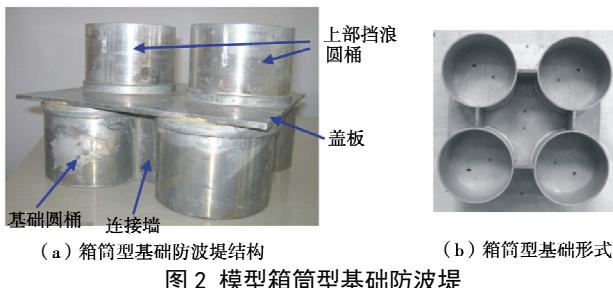


图 2 模型箱筒型基础防波堤

Fig. 2 Model structure of composite bucket foundation breakwater

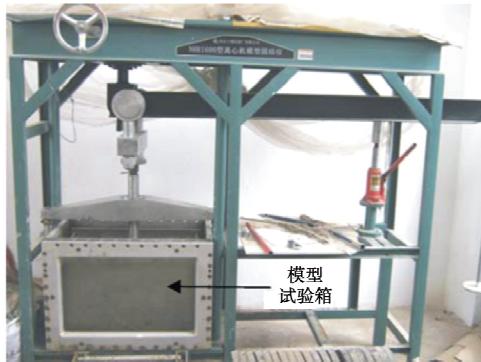


图 3 离心模型试验地基土体固结

Fig. 3 Consolidation of foundation soils in centrifuge model container

本文离心模型试验中模拟了厚度为 20 m 的黏土地基, 模型地基土层厚度大于 2 倍基础圆桶高度, 能够保证结构的变位不受模型箱边界的影响。将天津港现场取回的黏土, 在模型箱中制成泥浆, 通过离心模型固结仪对模型箱中的重塑土体施加不同的压力, 如图 3 所示, 排水固结后得到不同强度的黏土地基^[24], 固结后通过微型静力触探仪测得地基土体的平均强度如表 1 所示。黏土层下方为一层砂土, 是固结时的排水层。

1.3 试验程序和试验方案

离心试验程序如下: ①首先在 1g 条件下, 通过离心模型固结仪在模型箱中对土体施加固结压力, 制作均匀的黏土地基。②已有研究表明, 负压下沉或压入下沉方法对结构的稳定和承载特性不产生影响^[16], 本研究采用静力压入法, 将模型结构压入固结后的黏土地基中, 直至盖板底面与海床面齐平。③将模型箱置于离心超重力场中再次固结, 模拟结构下沉施工后, 由于结构重量引起的地基固结过程, 直至结构沉降稳定。④对箱筒型基础结构施加水平力和弯矩, 模拟波浪的作用, 直至结构达到失稳破坏条件。

采用 Goda 法计算天津港工程区域结构上的设计波浪力^[1], 并考虑曲墙上波浪力的折减^[6], 得出箱筒型基础结构上的设计波浪力 H_d 为 8465 kN, 海床面处的设计弯矩 M_d 为 37730 kN·m。本研究的加载方式与 Zhu 等^[16]和 Kim 等^[18]的方法相同, 通过将水平力 H

作用于不同的高度 e (e 为水平力作用点至海床面的距离), 实现了不同水平荷载和弯矩的组合, 如图 4 所示, 图中弯矩 $M=He$ 。

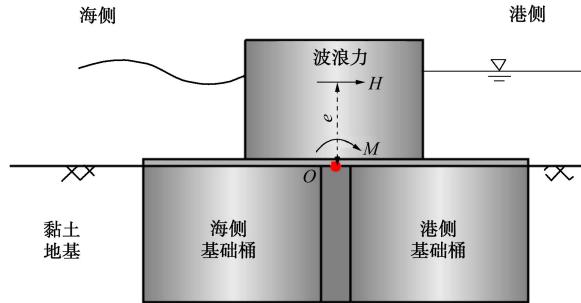


图 4 箱筒型基础防波堤受力示意图

Fig. 4 Sketch of composite bucket foundation breakwater under wave loads

本文试验方案如下: 试验模拟了 3 种不同的波浪力作用高度, 4.5 m 代表天津港工程区域的波浪作用高度, 10.5 m 和 13.5 m 代表波浪力作用高度较大的情况; 同时模拟了 3 种不同强度的地基土体条件, 不排水抗剪强度约 23 kPa 代表了天津港工程现场地基土体强度较小的情况, 不排水抗剪强度 37.4 kPa 和 44.5 kPa 代表了土体强度更高的情况。具体试验参数如表 1 所示。

表 1 离心试验方案

Table 1 Centrifuge test programs

试验编号	波浪力作用高度 e/m	土体不排水强度 S_u/kPa
S1	4.5	23.9
S2	10.5	22.9
S3	13.5	23.6
S4	10.5	37.4
S5	10.5	44.5

模型试验的布置如图 5 所示。通过调整静力加载装置作用高度, 模拟不同波浪力作用高度 e 。箱筒型基础结构的位移通过 3 个激光位移传感器测量, 2 个沉降 $V1$ 和 $V2$, 1 个水平位移 $H3$, 并计算结构的转角 θ 、水平位移量 u 、竖向位移量 v 。转角以向港侧转动为正、水平位移量以向港侧为正、竖向位移量以沉降为正。

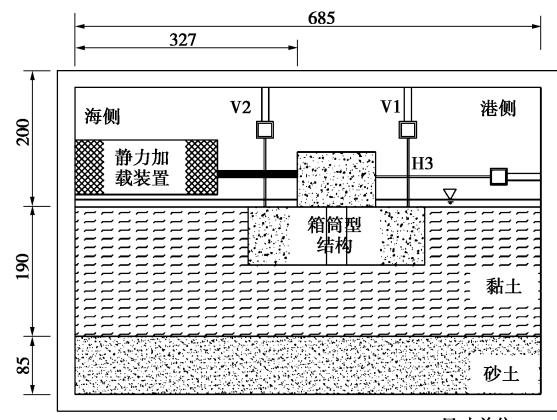


图 5 离心模型试验的布置

Fig. 5 Layout of centrifuge model

2 结构的荷载位移特性

2.1 结构位移

箱筒型基础结构的归一化弯矩 M/M_d (M_d 为前文计算的设计弯矩) 与转角 θ 的关系如图 6 所示, 其中图 6 (a) 为不同地基土体强度的结果, 图 (b) 为不同波浪力作用高度的结果。从弯矩 - 转角结果可见, 在不同土体强度和波浪力作用高度下, 结构均发生向港侧的转动。由图 6 (a) 可见, 土体强度越高对结构转动的约束越强, 在相同弯矩下转角越小。由图 (b) 可见, 相同弯矩下波浪力作用高度越大转角越小, 表明波浪作用高度增大, 相同弯矩时转角越小。

弯矩 - 转角曲线可分为两个阶段, 如图 6 (a) 所示, 弯矩小于临界值时, 弯矩 - 转角关系近似为弹性; 弯矩大于临界值后, 转角随着弯矩的增大迅速增大, 直至结构产生较大的转角而失稳破坏。Zhu 等^[16]和 Villalobos 等^[25]提出了单桶基础承载力确定方法, 即在荷载 - 位移曲线上分别对曲线第一阶段弹性变位阶段和第二阶段失稳阶段采用直线拟合, 在汇交点作水平线, 该水平线与荷载位移曲线的交点为承载力, 该方法同样被证明适用于确定三桶基础的承载力^[18, 26]。根据这一方法, 在箱筒型基础结构的弯矩 - 转角图中确定弯矩承载力 M_R , 如图 6 (a) 所示。同时从图 6 可见, 各组试验对应于弯矩承载力时的转角介于 $1.6^\circ \sim 2.8^\circ$ 之间。

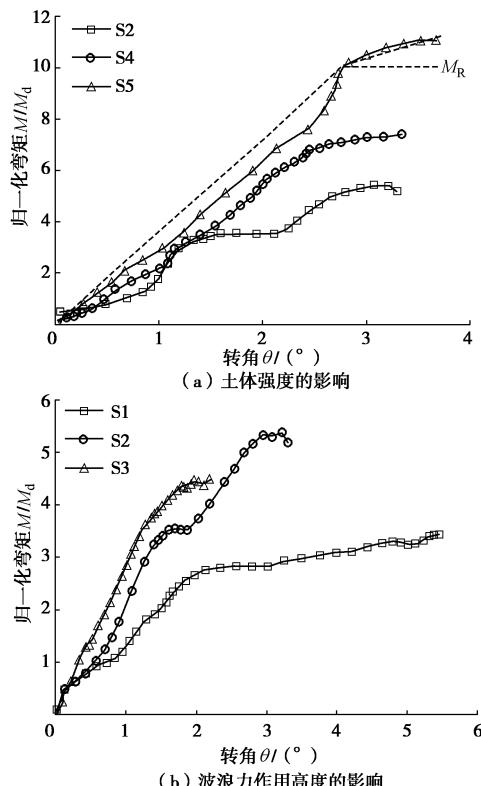


图 6 弯矩 - 转角结果

Fig. 6 Results of moment and rotational angle

箱筒型基础结构盖板底面中心 (图 4 中 O 点) 的归一化水平荷载 H/H_d 与水平位移量 u 的关系如图 7 所示。由图 7 水平位移结果可见, 在波浪荷载作用下, 防波堤盖板底面中心发生向港侧的水平位移, 仅有在 S1 试验中波浪力较小时有向海侧的水平位移。土体强度越高对结构的水平位移约束越强, 在相同水平荷载下水平位移量越小。相同水平荷载下波浪力作用高度越大结构盖板底面中心的水平位移越大, 表明波浪作用高度增大, 相同水平荷载时水平位移量越大。

与弯矩 - 转角曲线类似, 箱筒型基础结构的水平荷载 - 水平位移曲线也呈现为弹性变位和失稳破坏两个阶段, 如图 7 所示。根据上述承载力确定方法, 同样可在水平荷载 - 水平位移图中得出水平承载力 H_R , 如图 7 (a) 所示。从试验结果可见, 受土体强度、波浪力作用高度等因素的影响, 对应于水平承载力 H_R 时, 结构的水平位移量变化范围较大, 介于 $3 \sim 238$ mm 之间。

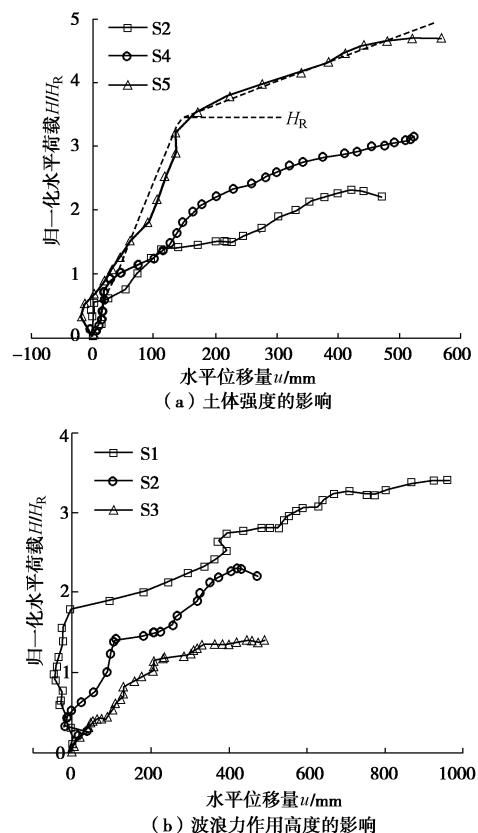


图 7 水平荷载 - 水平位移结果

Fig. 7 Results of horizontal load and horizontal displacement

箱筒型基础结构盖板底面中心 (O 点) 的归一化弯矩 M/M_d 与竖向位移量 v 的关系如图 8 所示。由图 8 可见, 在波浪荷载作用下, 盖板底面中心发生向下的竖向位移。箱筒型基础结构的竖向位移与转角、水平位移有着不同的规律, 在土体强度较低时 (S_u 约为 23 kPa, S1、S2 和 S3 试验), 弯矩 - 竖向位移曲线仍有

弹性变位和失稳破坏两个阶段; 土体强度为 37.4 kPa 时 (S4 试验), 弯矩 - 坚向位移曲线近似为线性关系; 土体强度为 44.5 kPa 时 (S5 试验), 坚向位移随着弯矩增大至一定值后, 又呈现减小的趋势, 表明土体强度增大至 44.5 kPa, 结构不会由于坚向位移引起失稳破坏。相同弯矩下波浪力作用高度越大结构盖板底面中心的坚向位移量越小, 表明波浪作用高度增大, 相同弯矩时坚向位移量越小。

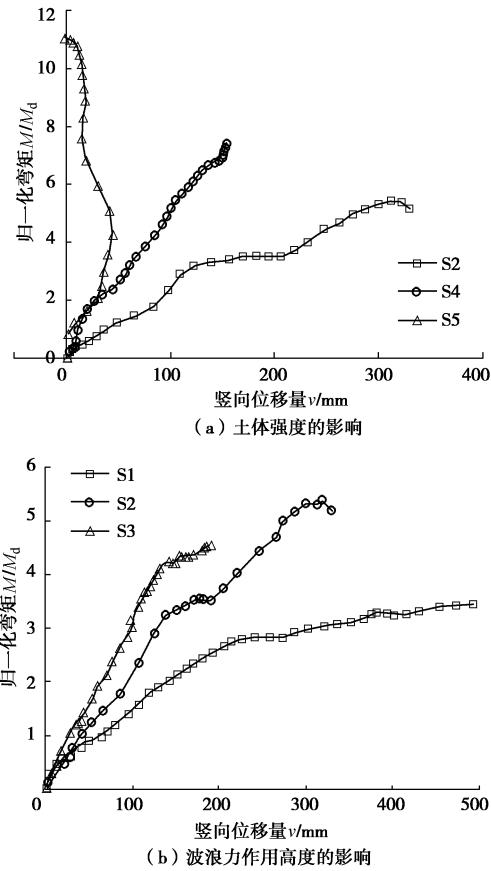


图 8 弯矩 - 坚向位移量结果

Fig. 8 Results of moment and vertical displacement

2.2 转动中心位置

结构的转动中心是加载过程的转动圆心, 转动中心对于分析结构位移规律具有重要作用^[16, 27]。根据箱筒型基础结构的转角、水平位移和坚向位移结果, 计算出转动中心深度随着归一化弯矩 M/M_d 的变化如图 9 所示。从结果可见: 在弯矩较小时, 转动中心位于海床面以上, 随着弯矩的增大, 转动中心不断向下移动, 弯矩大于 $1.2\sim1.8M_d$ 时, 转动中心逐渐移动至海床面以下。在不同的土体强度、波浪力作用高度下, 弯矩在达到承载力 M_R 时, 各组试验的转动中心均逐渐趋于桶底边缘附近, 约 9 m 深度处, 表明在达到弯矩承载力 M_R 时, 箱筒型基础结构将绕着基础桶底端向港侧转动而失稳。

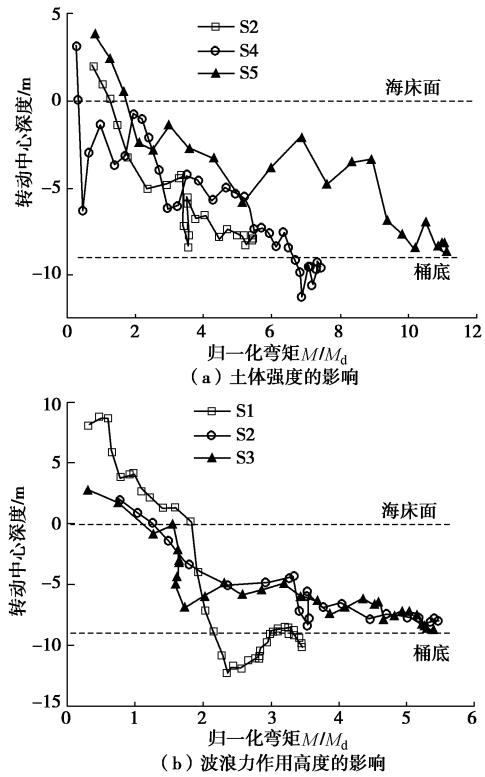


图 9 防波堤转动中心深度

Fig. 9 Depths of breakwater rotation center

3 结构失稳破坏模式和承载力特性

3.1 失稳破坏模式

箱筒型基础结构与单桶基础的结构形式有较大的差异, 基础部分具有多个分隔部分, 如图 2 (b) 所示, 且具有更小的高径比, 本研究中结构高径比为 0.33, 箱筒型基础结构的失稳破坏规律必然与单桶基础有较大的不同。文献[6]根据荷载位移曲线拐点稳定性判别标准, 得出 S1 试验的水平承载力为 $1.82H_d$, 本文根据 Zhu 等^[16]和 Villalobos 等^[25]的承载力确定方法得出的水平承载力为 $1.83H_d$, 与数值模拟结果较一致, 表明该方法可用于确定箱筒型基础结构的承载力。

根据荷载位移曲线得出了不同土体强度、波浪力作用高度下, 荷载为承载力时, 箱筒型基础结构盖板底面中点 O (如图 4 所示) 的位移结果如表 2 所示, 位移量大于表 2 中限值时, 结构将会由于承载力不足而失稳破坏。从结果可见, 由于受土体强度、波浪力作用高度等参数的影响, 箱筒型基础结构具有明显不同的失稳变位特性。

由表 2 可见, 土体强度为 23.9 kPa, 波浪力作用高度为 4.5 m 时 (S1 试验), 箱筒型基础结构的转角和坚向位移较大, 而水平位移较小, 失稳变位模式为转动和坚向位移的模式。土体强度约 23 kPa, 波浪力作用高度增大为 10.5 m 和 13.5 m 时 (S2 和 S3 试验),

结构的转角、水平位移和竖向位移均有较大值, 失稳变位模式为转动、水平位移和竖向位移的模式。

波浪力作用高度为 10.5 m, 土体强度为 22.9 kPa 和 37.4 kPa (对应于 S2 和 S4 试验), 结构的失稳变位模式为转动、水平位移和竖向位移的模式。当土体强度增大至 44.5 kPa (S5 试验), 承载力时结构竖向位移极小, 失稳变位模式为转动和水平位移的模式。

表 2 承载力时箱筒型基础结构中心的位移量

Table 2 Displacements of center of composite bucket foundation under bearing capacity

试验 编号	转角 $\theta/(\text{°})$	水平位移量 u/mm	竖向位移量 v/mm
S1	2.0	3	209
S2	1.6	108	166
S3	1.6	238	128
S4	2.5	185	147
S5	2.8	157	14

3.2 承载力特性

根据前述的承载力确定方法, 得出了不同土体强度、波浪力作用高度下, 箱筒型基础结构的水平承载力 H_R 和弯矩承载力 M_R , 并将 H_R/H_d 和 M_R/M_d 结果 (H_d 和 M_d 分别为前文定义的设计波浪力和设计弯矩) 绘制在 $M-H$ 平面内, 如图 10 所示。从图 10 可见, 受土体强度、波浪力作用高度的影响, 箱筒型基础结构具有不同的水平承载力 H_R 和弯矩承载力 M_R 的组合。

由图 10 可见, 在土体强度相同时 (S_u 约 23 kPa), 黏土地基中箱筒型基础结构的弯矩承载力随着水平承载力的增大而呈线性降低, 即弯矩承载力越大水平承载力越小, 趋势线如图中的实线。Zhu 等^[16]和 LeBlanc 等^[28]对砂土中刚性桩和单桶基础的承载力规律进行了研究, 表明在相对密度相同时 (土体状态一致) 结构的弯矩承载力 M_R 随着水平承载力 H_R 的增大而呈线性降低, 与本文的黏土中箱筒型基础结构的承载特性有相似的规律。根据离心试验结果, 一定土体强度下, 天津港箱筒型基础防波堤结构弯矩承载力与水平承载力间的关系可合理表示为

$$\frac{M_R}{M_d} = -0.854 \frac{H_R}{H_d} + 4.92 \quad . \quad (2)$$

在波浪力作用高度相同、土体强度不同时, 弯矩承载力随着水平承载力的增大而呈线性增长关系, 且地基土体强度越大, 水平承载力和弯矩承载力均越大, 表明土体强度增大, 明显增强了箱筒型基础结构的承载力。一定波浪力作用高度下, 天津港箱筒型基础防波堤结构弯矩承载力与水平承载力间的关系可表示为

$$\frac{M_R}{M_d} = 3.179 \frac{H_R}{H_d} - 0.745 \quad . \quad (3)$$

此外, 本文离心试验中土体强度是均一的, 如考虑地基土体强度沿着深度线性增大的情况, 由于深层

土体强度较高, 产生的嵌固效应将增强, 会导致结构承载力略增大^[29]。

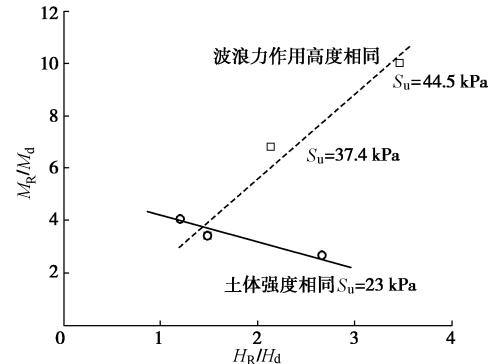


图 10 箱筒型基础防波堤承载力

Fig. 10 Bearing capacities of composite bucket foundation breakwater

4 结 论

本文通过离心试验研究了箱筒型基础防波堤失稳破坏模式和承载力特性, 并研究了土体强度、波浪力作用高度对其影响规律, 得到以下主要结论:

(1) 箱筒型基础结构的荷载与转角、水平位移曲线有弹性变位和失稳破坏两个阶段。而竖向位移受土体强度的影响呈现不同的规律, 土体强度约 23 kPa, 荷载 - 竖向位移曲线也呈现弹性变位和失稳破坏两阶段; 土体强度为 37.4 kPa, 荷载 - 竖向位移为线弹性关系; 土体强度为 44.5 kPa, 竖向位移先增大后减小。

(2) 随着弯矩的增大, 结构的转动中心从海床面上逐渐向地基中移动, 在达到弯矩承载力时, 转动中心的深度大致位于桶底端。

(3) 土体强度约 23 kPa, 波浪力作用高度为 4.5 m, 结构失稳时的变位模式为转动和竖向位移的模式; 土体强度不变, 波浪力作用高度增大为 10.5 m 和 13.5 m 时, 结构失稳时的变位模式为转动、水平位移和竖向位移的模式。波浪力作用高度为 10.5 m, 土体强度为 22.9 kPa 和 37.4 kPa, 结构的失稳变位模式为转动、水平位移和竖向位移的模式; 波浪力作用高度不变, 土体强度增大至 44.5 kPa 时, 失稳变位模式为转动和水平位移的模式。

(4) 土体强度相同时, 箱筒型基础结构的弯矩承载力随着水平承载力的增大呈线性降低关系; 波浪力作用高度相同时, 弯矩承载力随着水平承载力的增大呈线性增长关系。

参考文献:

- [1] MUSTAPPA M A, YAAKOB O B, AHMED Y M, et al. Wave energy device and breakwater integration: a review[J].

- Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, **77**: 43 - 58.
- [2] KOLEY S, SAHOO T. Wave interaction with a submerged semicircular porous breakwater placed on a porous seabed[J]. Engineering Analysis with Boundary Elements, 2017, **80**: 18 - 37.
- [3] OUMERACI H. 1994. Review and analysis of vertical breakwater failures—lessons learned[J]. Coastal Engineering, 1994, **22**(1/2): 3 - 39.
- [4] 闫澍旺, 侯晋芳, 刘润, 等. 长江口导堤在波浪荷载作用下的稳定性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, **25**(增1): 3245 - 3249. (YAN Shu-wang, HOU Jin-fang, LIU Run, et al. Stability analysis of guide dike in Yangtze estuary under action of wave load[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, **25**(S1): 3245 - 3249. (in Chinese))
- [5] 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))
- [6] 肖忠, 王元战, 及春宁, 等. 筒型基础防波堤稳定性有限元数值分析[J]. 土木工程学报, 2009, **42**(7): 828 - 833. (XIAO Zhong, WANG Yuan-zhan, JI Chun-ning, et al. Finite element analysis of the stability of bucket foundation breakwater[J]. China Civil Engineering Journal, 2009, **42**(7): 828 - 833. (in Chinese))
- [7] 蒋敏敏, 蔡正银, 徐光明, 等. 软土地基上箱筒型基础防波堤静力离心模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, **29**(增刊2): 3865 - 3870. (JIANG Min-min, CAI Zheng-yin, XU Guang-ming, et al. Experimental study of centrifugal model of bucket foundation breakwater on soft soil foundation under static load[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, **29**(S2): 3865 - 3870. (in Chinese))
- [8] 张金来, 鲁晓兵, 王淑云, 等. 桶形基础极限承载力特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(7): 1169 - 1172. (ZHANG Jin-lai, LU Xiao-bing, WANG Shu-yun, et al. The characteristics of the bearing capacity of bucket foundation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **24**(7): 1169 - 1172. (in Chinese))
- [9] BRANSBY M F, YUN G J. The undrained capacity of skirted strip foundations under combined loading[J]. Géotechnique, 2009, **59**(2): 115 - 125.
- [10] WANG X, YANG X, ZENG X. Centrifuge modeling of lateral bearing behavior of offshore wind turbine with suction bucket foundation in sand[J]. Ocean Engineering, 2017, **139**: 140 - 151.
- [11] 黎冰, 高玉峰, 沙成明, 等. 砂土中吸力式沉箱基础的最大承载力计算方法[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2012, **42**(6): 1201 - 1205. (LI Bing, GAO Yu-feng, SHA Cheng-ming, et al. Calculation method for maximum bearing capacity of suction caisson foundation in sand[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2012, **42**(6): 1201 - 1205. (in Chinese))
- [12] LIU M, YANG M, WANG H. Bearing behavior of wide-shallow bucket foundation for offshore wind turbines in drained silty sand[J]. Ocean Engineering, 2014, **82**: 169 - 179.
- [13] 刘润, 邱越, 李宝仁, 等. 复合加载模式下单桩复合筒型基础地基承载力包络线研究[J]. 岩土力学, 2016, **37**(5): 1486 - 1496. (LIU Run, QI Yue, LI Bao-ren, et al. Failure envelopes of single-pile composite bucket foundation of offshore wind turbine under combined loading conditions[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, **37**(5): 1486 - 1496. (in Chinese))
- [14] 范庆来, 施茂田. *V-H-T* 荷载空间内海上风机桶形基础破坏包络面特性分析[J]. 土木工程学报, 2010, **43**(4): 113 - 118. (FAN Qing-lai, LUAN Mao-tian. Failure envelopes of bucket foundation for offshore wind turbines in *V-H-T* loading space[J]. China Civil Engineering Journal, 2010, **43**(4): 113 - 118. (in Chinese))
- [15] ZHANG J H, ZHANG L M, LU X B. Centrifuge modeling of suction bucket foundations for platforms under ice-sheet-induced cyclic lateral loadings[J]. Ocean Engineering, 2007, **34**(8/9): 1069 - 1079.
- [16] ZHU B, BYRNE B W, HOULSBY G T. Long-term lateral cyclic response of suction caisson foundations in sand[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2013, **139**(1): 73 - 83.
- [17] COX J A, O'LOUGHLIN C D, CASSIDY M, et al. Centrifuge study on the cyclic performance of caissons in sand[J]. International Journal of Physical Modelling in Geotechnics, 2014, **14**(4): 99 - 115.
- [18] KIM D J, CHOO Y W, KIM J H, et al. Investigation of monotonic and cyclic behavior of tripod suction bucket foundations for offshore wind towers using centrifuge modeling[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental

- Engineering, 2014, **140** (5): 04014008-1-11.
- [19] 杨立功, 蔡正银, 徐志峰. 新型桶式基础防波堤桶体阻力分析[J]. 岩土工程学报, 2016, **38**(4): 747 - 754. (YANG Li-gong, CAI Zheng-yin, XU Zhi-feng. Numerical analysis of bucket resistance of new bucket foundation breakwater[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, **38**(4): 747 - 754. (in Chinese))
- [20] 王元战, 肖忠, 李元音, 等. 筒型基础防波堤土压力性状的有限元分析[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))
- [21] 肖忠, 王元战, 及春宁. 基于极限平衡法的箱筒型基础防波堤稳定性分析[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(5): 828 - 833. (XIAO Zhong, WANG Yuan-zhan, JI Chun-ning. Stability analysis of bucket foundation breakwaters based on limit equilibrium method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(5): 828 - 833. (in Chinese))
- [22] 王元战, 肖忠, 迟丽华, 等. 筒型基础防波堤稳定性简化计算方法[J]. 岩土力学, 2009, **30**(5): 1367 - 1372. (WANG Yuan-zhan, XIAO Zhong, CHI Li-hua, et al. A simplified calculation method for stability of bucket foundation breakwater[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, **30**(5): 1367 - 1372. (in Chinese))
- [23] LOH C K, TAN T S, LEE F H. Three-dimensional excavation test[C]// Proceedings of the International Conference Centrifuge 98, 1998, Tokyo: 649 - 654.
- [24] 蒋敏敏, 徐光明, 顾行文. 离心模型试验饱和黏性土制备和固结分析[C]// 第 25 届全国土工测试学术研讨会论文集, 2008, 杭州: 375 - 378. (JIANG Min-min, XU Guang-ming, GU Xing-wen. Preparation and analysis of saturated clay consolidation in centrifuge model test[C]// Proceedings of the 25th Chinese Academic Seminar on Geotechnical Soil Testing, 2008, Hangzhou: 375 - 378. (in Chinese))
- [25] VILLALOBOS F A, BYRNE B W, HOULSBY G T. An experimental study of the drained capacity of suction caisson foundations under monotonic loading for offshore applications[J]. Soils and Foundations, 2009, **49**(3): 477 - 488.
- [26] HUNG L C, KIM S R, 2014. Evaluation of undrained bearing capacities of bucket foundations under combined loads [J]. Marine Georesources & Geotechnology, 2014, **32**(1): 76 - 92.
- [27] DING H, LIU Y, ZHANG P. Model tests on the bearing capacity of wide-shallow composite bucket foundations for offshore wind turbines in clay[J]. Ocean Engineering, 2015(103): 114 - 122.
- [28] LEBLANC C, HOULSBY G T, BYRNE B W. Response of stiff piles in sand to long-term cyclic lateral loading[J]. Géotechnique, 2010, **60**(2): 79 - 90.
- [29] 郑刚, 俞丹瑶, 程雪松, 等. 考虑土体强度不均匀性时宽窄基坑底隆起稳定研究[J]. 岩土工程学报, 2019, **41**(增刊 1): 1 - 4. (ZHENG Gang, YU Dan-yao, CHENG Xue-song, et al. Basal heave stability of wide and narrow excavations considering non-homogeneous features of soft clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, **41**(S1): 1 - 4. (in Chinese))