

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2018.06.011

基于极限平衡法的单桶多隔舱结构防波堤稳定性分析

刘 龙^{1,2}, 丰土根^{1,2}, 曹永勇³

(1. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098;

2. 江苏省岩土工程技术工程研究中心, 江苏 南京 210098; 3. 南京水利科学研究院岩土工程研究所, 江苏 南京 210024)

摘要: 借助 ABAQUS 软件, 采用拟静力法分析结构在水平力下的运动模式及作用于基础桶土压力随水平荷载增加的变化规律。结果表明, 结构在水平力作用下绕某点转动, 转动中心随荷载增大而改变, 极限状态下处于结构中轴线位置; 作用于基础桶的土压力可分为主动、静止和被动 3 个区域。在此基础上, 推导了适用于该结构稳定性分析的极限平衡法, 鉴于其部分假定导致一定的误差, 相比于数值模拟结果, 极限平衡法计算值平均偏大 20% ~ 25%, 但 2 种方法得到的抗倾覆安全系数随土性、结构参数变化发展趋势基本一致。

关键词: 防波堤; 结构稳定性; 单桶多隔舱结构; ABAQUS; 拟静力法; 转动中心; 土压力; 极限平衡法
中图分类号: U653.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2018)06-0539-06

Stability analysis of the breakwater with multi-compartment single-bucket structure based on the limit equilibrium method

LIU Long^{1,2}, FENG Tugen^{1,2}, CAO Yongyong³

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Jiangsu Research Center for Geotechnical Engineering Technology, Hohai University, Nanjing 210098, China;

3. Department of Geotechnical Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China)

Abstract: The breakwater with multi-compartment single-bucket structure is a new type of structure applied in soft foundations. To explore the stress characteristics of multi-compartment single-bucket structure breakwater under horizontal loading is of great importance in its stability analysis. In this study, quasi-static force is adopted to analyze the motion mode and the earth pressure development acting on the structure as horizontal load increases. The results show that the structure rotates around a point below its foundation base under the acting of horizontal force. The rotation center moves to the axis position of the structure when reaching limit state. Meanwhile, earth pressures on the foundation bucket can be divided into active pressure, passive pressure and static pressure. On the basis of above conclusions, the limit equilibrium method is derived to analyze its stability. In addition, comparison of the anti-overturning safety factor between critical equilibrium method and finite element calculation shows that the difference between two data sets is about 20% ~ 25%, because of their different assumptions. Theoretical results are larger and the parametric changing tendency in limit equilibrium method agrees well with that of numerical simulation, which provides some reference data for theoretical design system of breakwater with multi-compartment single-bucket structure.

Key words: breakwater; structure stability; multi-compartment single-bucket structure; ABAQUS; quasi-static force method; rotation center; earth pressure; limit equilibrium method

基金项目: 国家自然科学基金(51009054); 中央高校基本科研业务费专项(2014B04914)

作者简介: 刘龙(1993—), 男, 硕士研究生, 主要从事岩土工程数值分析研究。E-mail: 17liu@hhu.edu.cn

通信作者: 曹永勇, 博士。E-mail: rawlinsoncao@hotmail.com

引用本文: 刘龙, 丰土根, 曹永勇. 基于极限平衡法的单桶多隔舱结构防波堤稳定性分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2018, 46(6): 539-544.

LIU Long, FENG Tugen, CAO Yongyong. Stability analysis of the breakwater with multi-compartment single-bucket structure based on the limit equilibrium method[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2018, 46(6): 539-544.

单桶多隔舱结构是在以往筒型基础上改进应用于连云港防波堤工程的新型桶式防波堤结构,尤其适用于软土地基,其工作性状受多种因素影响^[1-2],因结构与地基土相互作用更为复杂,有必要开展相关工作以完善设计理论体系,从而准确预估其在不同荷载、土质条件下的承载能力。相比于竖向荷载,服役期间来自于风浪等水平向荷载对于结构稳定性影响更大。水平力作用下,沉入式基础主要依靠地基土反力以维持结构的稳定性,因此作用于结构基础桶壁的土压力计算是稳定性验算的核心内容。王元战等^[3]利用有限元软件分析了作用于箱筒型基础的土压力分布规律。蔡正银等^[4]研究单桶多隔舱结构桶壁土压力竖向分布,得到的结论与文献[3]相似,桶壁土压力分布可分为海侧主动区和陆侧被动区,有助于准确把握结构的受力特点,进而对结构进行稳定性分析。孙曦源等^[5]针对单桶型基础提出了改进的极限平衡法求解水平承载力。杨立功等^[6]则推导了桶式基础防波堤结构抗倾覆稳定性验算的三维表达式,但极限状态下结构转动中心的具体位置尚未达成共识^[7]。基于 ABAQUS 平台,本文建立单桶多隔舱结构防波堤三维分析模型,研究作用于基础桶的土压力分布规律,确定极限状态下结构转动中心的位置,从而建立适用于单桶多隔舱结构稳定性分析的极限平衡计算模型。

1 工程概况

1.1 结构形式

每一组单桶多隔舱结构由下部1个椭圆桶体和上部2个圆桶体组成,下部基础桶由横、纵向隔墙分为9个隔舱;多组结构在工厂预制完成后现场沉放安装互相连接形成连续的防波堤挡浪结构。单组结构断面见图1,防波堤平面布置如图2所示。

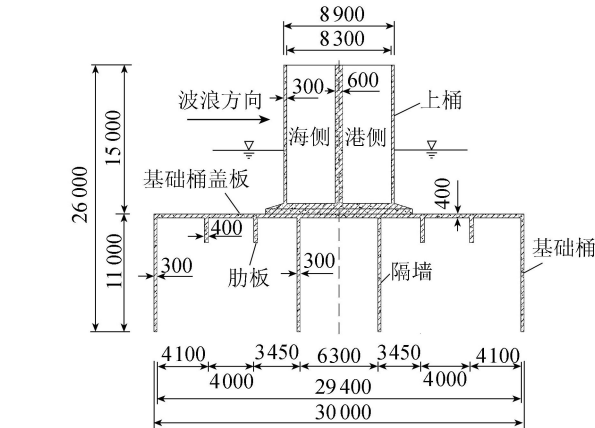


图1 单桶多隔舱结构断面(单位:mm)

Fig.1 Section of the multi-compartment single-bucket structure (units: mm)

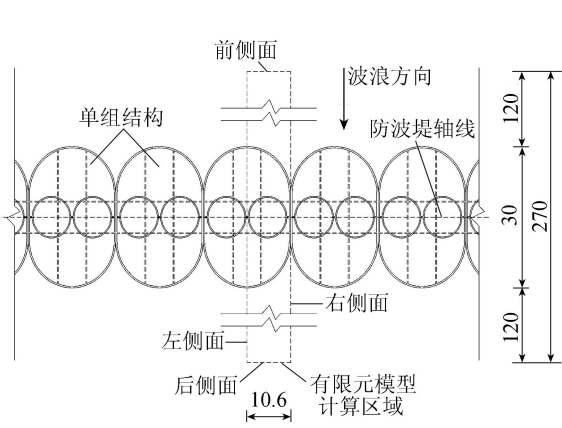


图2 防波堤平面布置(单位:m)

Fig.2 Plane layout of multi-compartment single-bucket structure breakwaters (units: m)

1.2 水文条件

连云港市徐圩港区设计低水位0.47 m,极端高水位6.56 m,极端低水位-0.68 m。工程建设海域50年一遇设计高水位5.41 m,波列累积频率为1%的波高为6.34 m,周期为8.76 s,波长80.9 m,设计波浪力为12048 kN。

1.3 地质条件

建堤区域地基土层自上而下依次为:淤泥层、粉质黏土层和粉砂粉土层,各土层主要土性参数见表1。

表1 各土层主要土性参数

Table 1 Main parameters of soil layers

土 层	土层厚度/ m	天然含水率 $w/\%$	密度 $\rho/$ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	天然孔隙比 e_0	压缩系数 a_{1-2}/MPa^{-1}	液性指数 I_L	压缩模量 E_s/MPa	快剪	
								黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$
淤泥层	9.1	64.8	1.58	1.819	1.82	1.37	1.61	6.7	2.5
粉质黏土层	4.3	27.1	1.92	0.770	0.39	0.53	4.98	37.8	10.7
粉砂粉土层	30.6	20.0	2.00	0.587			6.53		

2 有限元分析

2.1 有限元模型验证

利用 ABAQUS 软件 1 : 1 建模,结构施加刚体约束;土体本构选用 Mohr-Coulomb 模型,土体参数取值见表 1。利用结构和荷载的对称性,取单组结构的一半作为分析对象。参考已有数值算例^[8-10],土体计算域范围如下:垂直于防波堤轴线方向,两侧各取结构长轴尺寸的 4 倍,土体深度取为基础桶高度的 4 倍。结构与土相互作用通过建立主从接触对实现,接触对设定面对面离散、有限滑动接触跟踪方法。接触面法向模型为硬接触,切向采用库仑摩擦,摩擦系数取 0.13^[11],单元类型选用 C3D8R(8 节点六面体线性减缩积分单元)。为验证三维有限元模型的正确性,模拟离心试验^[12]结构承受水平荷载工况与之对比(基础桶高度为 9.6 m),水平力通过设置多个分析步施加从而获得结构的荷载位移曲线,结果如图 3 所示。

由图 3 可知,2 条曲线位移发展趋势完全一致,局部数值存在一定偏差。土体本构只有内摩擦角、黏聚力 2 个基本参数,距准确反映土体性质有一定差距。整体而言验证结果良好,建立的三维有限元分析模型可作为后续相关数值分析的基础。

2.2 基础桶土压力分布模式

对结构进行拟静力分析,采用力控制法分级施加荷载,有限元输出接触面法向压力 CPRESS 可视为作用于结构的土压力。定义荷载加载系数 α 为水平荷载与设计波浪力 P_D 的比值,根据结构荷载位移曲线、土与结构之间接触应力,选取 α 分别为 0.45、1.01、1.46 和 1.91 对应时刻土压力进行分析,其对应工作形态分别为荷载位移曲线线性变形终点、海侧基础桶内壁与土完全脱离、海侧隔墙内壁与土完全脱离、港侧隔墙外壁与土完全脱离。土压力分析结点均位于结构中轴线,分析路径如图 4 所示。

2.2.1 港侧桶壁土压力

海侧基础桶内壁土压力介于主动土压力与静止土压力之间(文中涉及土压力计算值问题均指朗肯理论计算值),如图 5(a)所示。图 5(b)显示基础桶外壁土压力随荷载增加逐渐由静止土压力趋近于被动土压力。因结构转动,桶外壁上部土体达到被动极限平衡状态,桶壁下部有背离土体运动的趋势,故下部土压力略小于被动土压力,与文献[13]对于刚性挡墙转动下被动土压力研究得到的规律是一致的,认定此时刻该侧土体为被动土压力区。

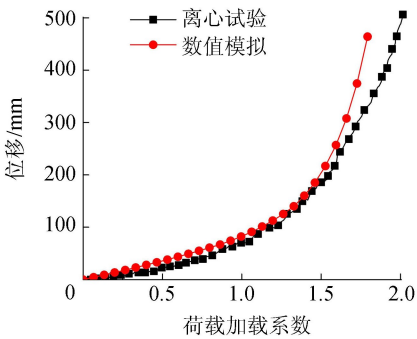


图 3 数值模拟与离心试验结果对比
Fig.3 Comparison between numerical simulation and centrifuge test

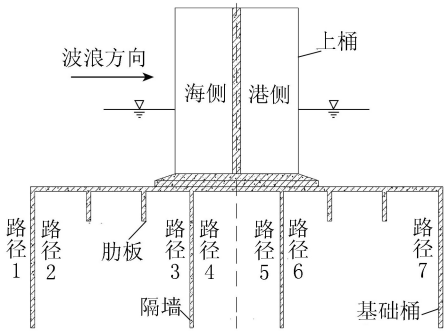


图 4 土压力分析路径
Fig.4 Analysis path of earth pressure acting on the foundation bucket

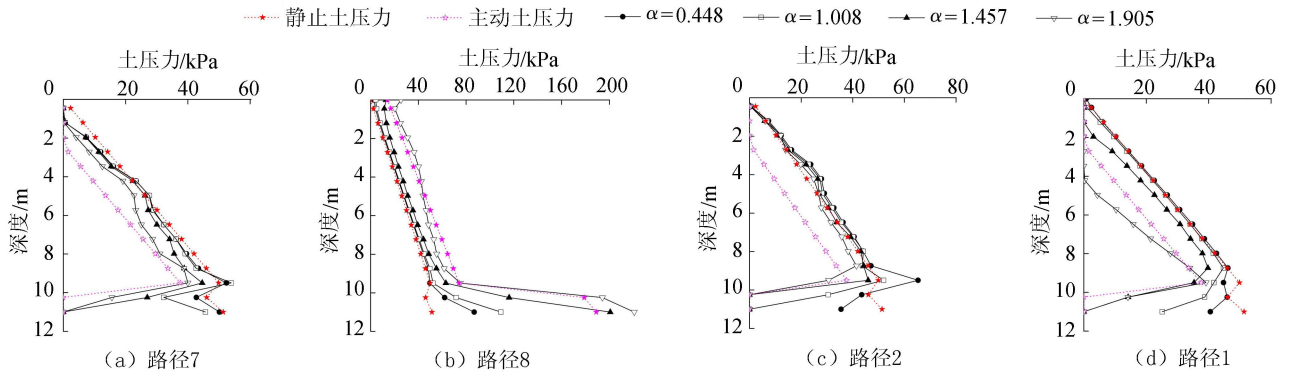


图 5 不同荷载水平下沿不同路径的土压力分布
Fig.5 Distributions of earth pressure along stress paths under different loading levels

$$M_{T_a} = \iint_{S_2} \tau_a (R \cos \theta + d) dS = 2 \int_{-\frac{2c}{\rho' \sqrt{K_a}}}^L \int_0^{\frac{\pi}{2}} \tau_a R (R \cos \theta + d) d\theta dz \tag{5}$$

式中: d ——结构半圆形区域圆心到中轴线的距离,m。

根据美国 API,软黏土单位面积壁面摩阻力(即上文中 τ_p 、 τ_a)不大于土体不排水抗剪强度 c_u ,最大可取为 c_u 。

3.1.4 基础桶底的土反力

持力层粉质黏土层土性相对较好,假设土体服从 winkler 假定。将港侧隔墙外壁与土体完全脱离作为其极限状态判别标准。故设港侧隔墙外壁土反力为零,港侧桶外壁土反力达极限土反力,两者范围内呈线性变化,根据美国 API,软黏土最大端阻应力 σ_{max} 为 $9c_u$,故基础桶底土反力 R_1 对转动点的力矩 M_{R_1} 为

$$M_{R_1} = B \int_{x_0}^d \frac{\sigma_{max}}{R + d - x_0} (x - x_0) x dx + 2 \int_d^{R+d} \frac{\sigma_{max}}{R + d + x_0} (x - x_0) \sqrt{R^2 - (x - d)^2} x dx \tag{6}$$

式中: B ——防波堤轴线方向结构水平尺寸,m; x_0 ——港侧内隔墙外壁到结构中轴线的距离,m。

3.1.5 土体对基础桶底的水平切力

土体对基础桶底的水平切力 T 与 P_D 方向相反,水平切力极限值 T_{max} 计算参考文献[8],定义结构发生滑动破坏时水平荷载与 P_D 的比值为抗滑稳定性安全系数 K_s ,发生倾覆破坏时荷载与 P_D 的比值为抗倾覆稳定性安全系数 K_q 。

3.2 稳定性分析

以实际工程中基础桶高度为 11 m、直径为 20 m 的结构为例进行稳定性分析,参考文献[8]联立结构的竖向力、水平力及力矩平衡方程,解得: $K_q = 2.405$, $T = 21\,342.37$ kN。结构达到抗滑极限平衡时, $T_{max} = c_u A = 30\,849.56$ kN,解得 $K_s = 3.19$, $K_s > K_q$ 。即随水平荷载增加,结构首先发生倾覆破坏,与数值模拟结构运动模式一致。

运用极限平衡法分别计算不同摩擦角 φ 、黏聚力 c 和基础桶高度 L 情况下对应结构的抗倾覆安全系数 K_q ,与有限元分析结果对比见表 2。

表 2 不同内摩擦角极限平衡法与有限元计算结果对比

Table 2 Comparisons between limit equilibrium method and numerical simulation for different friction angles											
$\varphi/(^{\circ})$	K_q		$\delta/\%$	c/kPa	K_q		$\delta/\%$	L/m	K_q		$\delta/\%$
	极限平衡法	有限元法			极限平衡法	有限元法			极限平衡法	有限元法	
2.5	2.41	1.90	26.8	6.7	2.41	1.90	26.8	10.5	2.37	1.79	32.4
5.0	2.42	1.91	26.7	13.4	2.50	2.02	23.8	11.0	2.41	1.90	26.8
7.5	2.45	1.94	26.3	20.1	2.59	2.24	15.6	11.5	2.45	2.02	21.3
10.0	2.47	2.02	22.2	26.8	2.68	2.35	14.0	12.0	2.49	2.05	21.5
12.5	2.51	2.13	17.8	33.5	2.76	2.47	11.7	12.5	2.54	2.24	13.4

注: $\delta = (K_{q\text{ 极限平衡法}} - K_{q\text{ 有限元法}}) / K_{q\text{ 有限元法}} \times 100\%$ 。

可以看出,极限平衡法计算值略大于数值分析结果,平均误差接近 20% ~ 25%,分析原因如下:(a)文献[14]指出将基础桶内土体与结构视为整体会高估结构的承载力;(b)极限状态判别标准及其转动中心位于中轴线的目的是统一计算标准,严格讲,转动中心以中轴线略偏港侧,故原假设使桶底土体反力对结构抗倾覆力矩偏大,导致极限平衡法计算值偏大。

4 结 论

- a. 水平力作用下,结构达到极限平衡状态时,港侧桶外壁土压力近似等于朗肯被动土压力,海侧桶外壁土压力按朗肯主动土压力考虑,基础桶内土压力视为静止土压力。
- b. 根据多组模型数值计算结果,将港侧隔墙外壁与土体完全脱离作为其极限状态判别标准,达到极限状态时结构转动中心稳定在中轴线位置、桶底以下。
- c. 结合土压力分析结果,建立了适用于该结构稳定性分析的极限平衡计算模型。由于部分假定导致的误差,与有限元结果相比,极限平衡法计算值平均偏大 20% ~ 25% 左右。

参考文献:

[1] 林捷, 贺瑞, 郑金海. 海上风力发电机桶形基础竖向初始动阻抗影响因素分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2017, 45(3): 263-270. (LIN Jie, HE Rui, ZHENG Jinhai. Analysis of factors influencing vertical initial dynamic impedance of bucket foundations for offshore wind turbine[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2017, 45(3): 263-270. (in Chinese))

[2] ZHOU Mi, HOSSAIN M S, HU Yuxia, et al. Installation of stiffened caissons in Non-Homogeneous clays[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironment Engineering, 2016, 142(2):1-14.

[3] 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 Yuanzhan, XIAO Zhong, LI Yuanyin, 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))

[4] 蔡正银, 杨立功, 关云飞, 等. 新型桶式基础防波堤单桶桶壁土压力数值分析[J]. 水利水运工程学报, 2016 (10): 39-46. (CAI Zhengyin, YANG Ligong, GUAN Yunfei. Numerical analysis of soil pressure on single bucket wall of new bucket foundation breakwater[J]. Hydro-Science and Engineering, 2016 (10): 39-46. (in Chinese))

[5] 孙曦源, 栾茂田, 唐小微. 饱和软黏土地基中桶形基础水平承载力研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(2): 668-672. (SUN Xiyuan, LUAN Maotian, TANG Xiaowei. Study of horizontal bearing capacity of bucket foundation on saturated soft clay ground [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(2): 668-672. (in Chinese))

[6] 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))

[7] 杨会东, 杨立功. 沉入式新型桶式防波堤抗倾滑移稳定性计算[J]. 水运工程, 2016(4):40-44. (YANG Huidong, YANG Ligong. Computation method of anti-sliding stability of new bucket breakwater[J]. Port & Waterway Engineering, 2016 (4):40-44. (in Chinese))

[8] 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 Yuanzhan, JI Chunng. Stability analysis of bucket foundation breakwaters based on limit equilibrium method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(5): 828-833. (in Chinese))

[9] 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. (JIANG Minmin, CAI Zhengyin, Xiao Zhaoran. Numerical study on earth pressure on foundation bucket of bucket foundation breakwater [J]. Port and Waterway Engineering, 2012 (3): 20-23. (in Chinese))

[10] ZHOU Mi, HOSSAIN M S, HU Yuxia, et al. Behaviour of ball penetrometers in uniform and layered clays[J]. Geotechnique, 2013, 63(8): 682-694.

[11] 曹永勇. 单桶多隔舱结构防波堤与软土地基相互作用研究[D]. 南京: 南京水利科学研究院, 2014.

[12] 陈海峰, 李武. 桶式防波堤离心模型试验[J]. 水运工程, 2016(3):57-61. (CHEN Haifeng, LI Wu. Centrifugal model test of bucket-based breakwater[J]. Port and Waterway Engineering, 2016 (3): 57-61. (in Chinese))

[13] 陈页开. 挡土墙上土压力的试验研究与数值分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(8): 1275-1279. (CHEN Yekai. Testing study and numerical analysis on earth pressure on retaining wall [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(8): 1275-1279. (in Chinese))

[14] BRANSBY M F, YUN G J. The undrained capacity of skirted strip foundations under combined loading[J]. Geotechnique, 2009, 59(2):115-125.

(收稿日期:2017 -07 -30 编辑:张志琴)