

· 港口 ·



# 沉入式新型桶式防波堤抗倾滑移稳定性计算

杨会东<sup>1</sup>, 杨立功<sup>2</sup>

(1. 东南大学 成贤学院, 江苏 南京 210088; 2. 南京水利科学研究所, 江苏 南京 210024)

**摘要:** 作为一种轻型直壁式防波堤结构, 在波浪荷载作用下, 新型桶式防波堤抗滑移稳定性是这种桶式基础结构稳定性计算的重要部分, 由于这种桶体结构的复杂性, 规范中尚未提出针对这种新型结构的抗滑稳定性计算方法. 假设沉入较深土层的桶式防波堤极限状态下的抗滑稳定性主要由桶壁土压力、桶底土剪力、桶土自重维持, 桶与土体看作一个整体, 其工作原理与重力式挡土墙类似, 在波浪荷载作用下桶体绕转动中心转动, 陆侧桶壁为被动区域, 海侧桶壁为主动区域. 假定极限状态下桶体两端顶部分别达到被动土压力状态、主动土压力状态, 同时在桶体底部土体剪力也达到极限状态. 基于上述假设, 通过解析的方式, 建立了考虑桶体转动影响的三维桶式防波堤抗滑稳定性计算方法.

**关键词:** 新型桶式防波堤; 抗滑稳定性; 桶壁土压力

中图分类号: U 653. 4

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)04-0040-05

## Computation method of anti-sliding stability of new bucket breakwater

YANG Hui-dong<sup>1</sup>, YANG Li-gong<sup>2</sup>

(1. Chengxian College of Southeast University, Nanjing 210088, China; 2. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China)

**Abstract:** For a light breakwater structure, the anti-sliding stability is an important part to calculate the stability of the new breakwater under the wave load. Due to the complexity of the structure, there isn't any stipulation yet on the computation method of the anti-sliding stability for this new breakwater structure. We assume that the stability of an embedded new bucket breakwater mainly depends on the soil pressure on the wall, the shear stress at the bottom of the bucket, and the self-weight of the bucket and the soil in the bucket. The bucket and the soil in it are regarded as an entirety. Such a breakwater works under a similar principle as a gravity retaining wall. Supposing that the bucket rotates around the rotating centre of the bucket, the soil on the wall of the harbor side is under passive state, and the soil on the wall of the sea side is under the active state. It supposes that the soil pressure on both ends of the bucket wall reaches the passive soil pressure state and active soil pressure state respectively under the ultimate state, and at the same time, the shear stress under the bucket also reaches its ultimate state. Based on the above-mentioned hypothesis, by means of derivation and analysis, the computation method of anti-sliding stability of 3D embedded new bucket breakwater considering the influence of the rotation is established.

**Keywords:** new bucket breakwater; anti-sliding stability; soil pressure on wall

随着我国港口建设的发展, 传统防波堤结构在大型、新型港口建设中的应用受到不同程度的制约. 为此, 无底、下部带 9 个隔舱的近椭圆形薄壁桶体、上部为薄壁双圆筒组合的新型桶式基础防波堤开始使用于港口工程中(图 1). 这种防

波堤先在岸上预制, 然后直接浮运下沉至海底地基土中, 不需要对地基土体加固, 其抗滑稳定性完全通过海底土体的嵌固作用来维持, 也就是靠其自重及桶壁、桶底与土体的协同工作来抵抗外力。

收稿日期: 2015-10-21

作者简介: 杨会东 (1982—), 男, 硕士, 讲师, 从事防波堤技术的设计和数值分析。

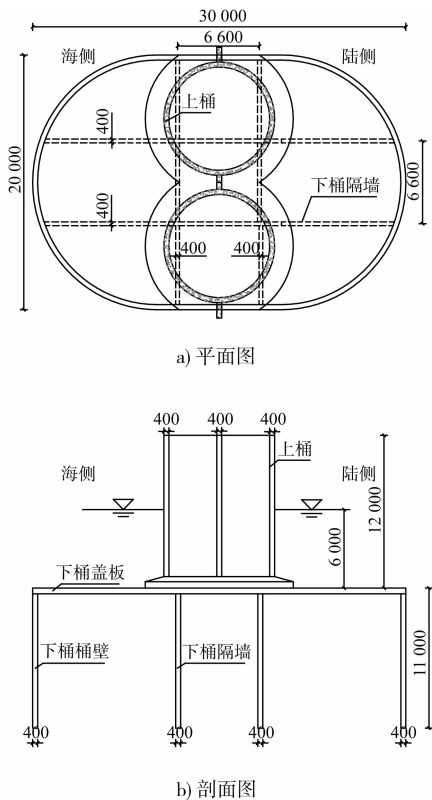


图1 沉入式新型桶式基础防波堤结构 (单位: mm)

重力式挡墙的抗滑稳定性计算可表示为抗滑力与滑动力的比值<sup>[1-2]</sup>。根据一般重力式结构的抗滑稳定性计算方法,在类似防波堤工程研究中,刘建起<sup>[3]</sup>、王元战<sup>[4-5]</sup>在大圆筒抗滑稳定性计算时,将筒体自重、筒内填料分别乘以其相对地基土的摩擦系数,计算大圆筒结构与地基土之间的摩擦力。

本文中的新型桶式基础防波堤结构,其抗滑稳定性可借鉴重力式挡墙及大圆筒结构的抗滑稳定性计算方法进行分析,并且考虑了桶体转动对其抗滑稳定性的影响。

## 1 二维抗滑稳定性简化计算

### 1.1 不考虑转动影响的抗滑稳定性

波浪荷载作用下,桶体长轴方向为荷载作用方向,实际工程中,桶体短轴方向依次排列,形成整体防波堤,因此,为便于分析桶体结构的抗滑稳定性,将图1中三维桶体模型沿长轴方向简化为图2中的二维结构进行分析,其抗滑稳定性计算简图见图2。长轴方向取中轴截面、短轴方向

取单位宽度的桶体进行分析。极限状态下,在迎浪侧,假定桶壁土压力达到主动土压力;在背浪侧,假定桶壁土压力达到被动土压力。由于桶内较多隔墙,而且地基土为淤泥及粉质黏土,桶内土体不易脱离,因此,将桶体与桶内土体看作一个整体重力式结构,极限状态下,桶体底部土体的剪应力也达到极限状态。

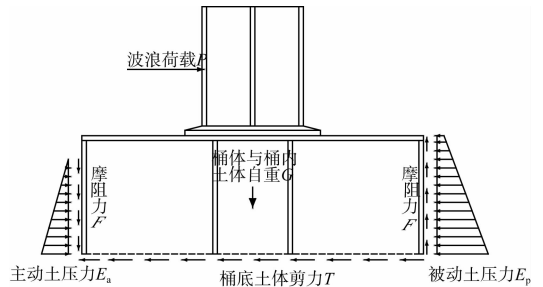


图2 重力式桶体结构计算简图

根据图2所示的重力式桶体结构抗滑稳定性计算简图,得到桶体抗滑移稳定系数 $k_0$ 为:

$$k_0 = \frac{E_p + T}{P + E_a} \quad (1)$$

式中: $E_p$ 为极限条件下被动侧桶壁顶端土压力合力; $E_a$ 为极限条件下主动侧桶壁顶端土压力合力; $T$ 为极限条件下重力式桶体结构底端平面上的剪力; $P$ 为波浪荷载合力。

由式(1)中可以看出,不考虑桶体转动的抗滑稳定性与荷载作用点的高度无关,而事实上,当荷载作用点高度不同时,尽管波浪荷载 $P$ 不变,但桶体转角也不同,转角越大,桶体的滑移量越大。利用ABAQUS有限元软件,对土体采用南水模型,按照实际桶体尺寸建模分析,在进行二维模型的数值模拟中,同一荷载水平、不同荷载点作用高度下,桶体的水平位移与转角关系见图3。从图3可以看出,桶体滑移量随着桶体转角的增大而增大。

数值模拟中,50 a一遇的波浪荷载合力为 $P_{pp}$ ,实际加载为 $P$ ,不同荷载水平 $P/P_{pp}$ 下,桶体转角见图4。由图4可以看出,当 $P/P_{pp} \leq 1$ 时,桶体转角比较小,约为 $0.5^\circ$ ,当 $P/P_{pp} \geq 1$ 时,桶体转动逐渐加剧。因此,在极限条件下进行桶体抗滑移稳定性计算时,桶体转角的影响不可忽略。

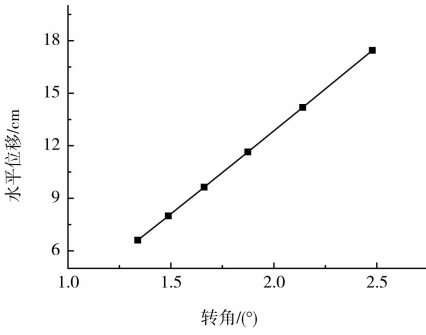


图3 桶体水平位移与转角关系

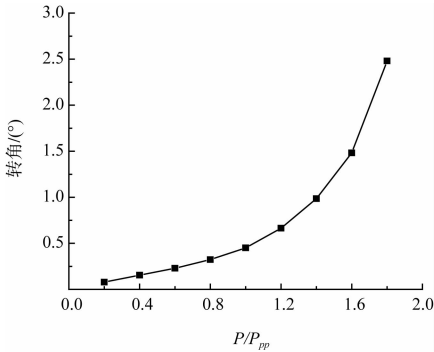


图4 桶体转角与荷载水平关系

在波浪荷载作用下，桶体发生滑移及转动，而桶体转动的结果将进一步影响桶体的滑移。因此，在进行桶体抗滑稳定性分析时，尤其在极限状态下，桶体转动较大，需要考虑桶体转动的影响。

### 1.2 考虑转动影响的抗滑稳定性

在进行大圆筒结构的稳定性分析时，竺存宏<sup>[6]</sup>通过模型试验、Luan M T<sup>[7]</sup>和范庆来<sup>[8]</sup>通过数值分析均发现，水平荷载作用下，在大圆筒体内部存在一个转动中心  $O$ ，波浪荷载作用下，桶体绕转动中心转动。本文所进行的数值模拟中，也发现在桶体下部的土体内存在一个转动中心(图5)。

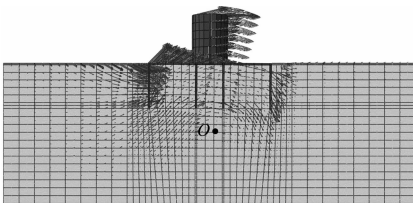


图5 桶体转动中心

假设桶体绕转动中心发生的转角为  $\phi$ ，发生转动后，桶体抗滑稳定性计算简图见图6。

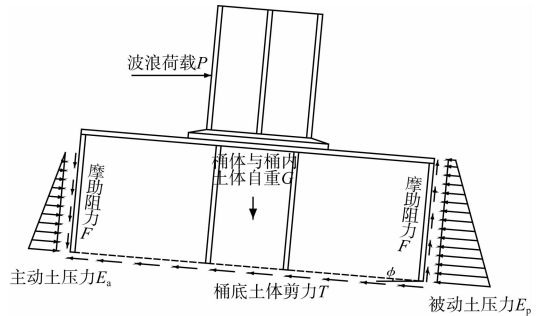


图6 桶体转动后计算简图

根据图6，可计算考虑转动效应影响的桶体结构二维抗滑移稳定系数  $k'_0$ ：

$$k'_0 = \frac{E_p + T - G \sin \phi}{P \cos \phi + E_a} \quad (2)$$

式中： $\phi$  为极限条件下桶体转角。

由于桶体及桶内土体自重很大，虽然桶体转角很小，但从式(2)中可以看出，考虑桶体转动后，桶体抗滑移稳定系数将会有所降低。

## 2 三维条件下抗滑稳定性计算

在进行三维条件下桶体抗滑稳定性分析之前，必须确定图7中圆弧段  $BM$ 、 $CM$ 、 $DN$ 、 $EN$  和直壁段  $BD$ 、 $CE$  上的土压力分布。

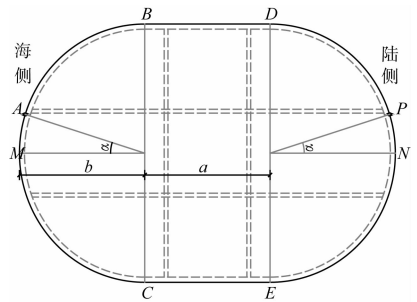


图7 桶体平面

针对软土地基上的桶式基础防波堤，利用ABAQUS有限元软件，通过三维有限元分析，在海侧及陆侧圆弧端，即图7中的  $BMC$ 、 $DNE$  段，单宽桶壁土压力的合力  $E_a$  与夹角  $\alpha$  有如图8的关系，即  $E_a$  与  $\alpha$  有近似线性的关系。

在直壁端的  $BC$ 、 $CE$  段上，桶壁土压力与采用 Rankine 理论计算的静止土压力比较接近。

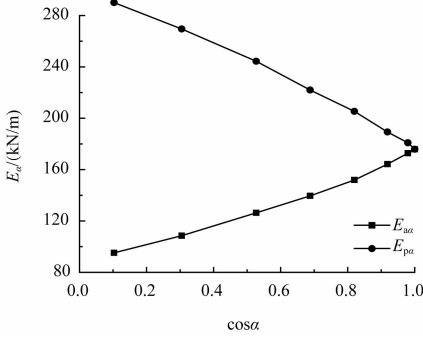


图8 桶壁圆弧段单宽土压力合力随夹角 α 的变化

在极限状态下, 假定桶体两端顶部分别达到主动土压力、被动土压力状态, 海侧圆弧段及陆侧圆弧段上, 任意截面上的土压力可表示为:

$$E_{a\alpha} = (E_a - E_0) \cos \alpha + E_0 \quad (3)$$

$$E_{p\alpha} = (E_p - E_0) \cos \alpha + E_0 \quad (4)$$

在两侧直壁端 BC、CE 段上, 桶壁土压力为:

$$E_s = E_0 \quad (5)$$

式中:  $E_{a\alpha}$ 、 $E_{p\alpha}$ 、 $E_s$  分别表示海侧、陆侧圆弧段、直壁段上单宽桶壁土压力合力;  $E_a$ 、 $E_p$ 、 $E_0$  分别表示主动、被动、静止土压力合力。

### 2.1 不考虑转动影响的抗滑稳定性

极限状态下, 海侧、陆侧及直壁段桶壁土压力的合力分别为:

$$E_1 = b \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} E_{a\alpha} d\alpha = b \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} [(E_a - E_0) \cos \alpha + E_0] d\alpha = b [(\pi - 2)E_0 + 2E_a] \quad (6)$$

$$E_2 = b \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} E_{p\alpha} d\alpha = b \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} (E_p - E_0) \cos \alpha + E_0 d\alpha = b [(\pi - 2)E_0 + 2E_p] \quad (7)$$

$$E_3 = aE_0 \quad (8)$$

参考图 2, 三维条件下桶体抗滑移稳定系数  $k_1$  为:

$$k_1 = \frac{E_2 + 2E_3 \tan \delta + T}{P + E_1} \quad (9)$$

$$T = \tau(\pi b^2 + 2ab) \quad (10)$$

式中:  $\delta$  为桶壁与土体之间的摩擦角;  $\tau$  为桶底平面上土体剪应力。

### 2.2 考虑转动影响的抗滑移稳定性

根据图 6, 可计算考虑转动效应影响的桶体结构抗滑移稳定系数  $k'_1$ :

$$k'_1 = \frac{E_2 + 2E_3 \tan \delta + T - G \sin \alpha}{P \cos \alpha + E_1} \quad (11)$$

## 3 实例分析

位于连云港徐圩港区的桶式基础防波堤为直立堤, 单桶结构下桶为近椭圆形, 上桶为双圆筒, 下桶沉入海底土中, 上桶为直立挡浪结构(图 9)。桶侧上层土体为 10 m 厚淤泥层, 有效内摩擦角  $\varphi'_1$  为  $6.6^\circ$ , 有效粘聚力  $c'_1$  为 10.4 kPa; 下层土体为粉质黏土, 有效内摩擦角  $\varphi'_2$  为  $17.5^\circ$ , 有效粘聚力  $c'_2$  为 45 kPa。淤泥有效密度  $\rho'_1 = 0.68 \text{ t/m}^3$ , 取  $\delta'_1 = \frac{1}{3} \varphi'_1$ ; 粉质黏土有效密度  $\rho'_2 = 0.92 \text{ t/m}^3$ , 取  $\delta'_2 = \frac{1}{3} \varphi'_2$ 。

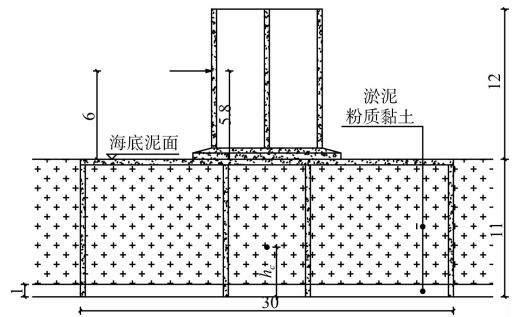


图9 防波堤桶体剖面 (单位: m)

利用 Rankine 土压力理论, 由式(1)、(2)、(9)、(11) 计算各种工况下桶体抗滑移稳定系数, 结果见表 1。

表 1 不同工况下桶体抗滑移稳定系数

工况	稳定系数 1	稳定系数 2
二维条件下不考虑桶体转动	1.99	1.99
二维条件下考虑桶体转动	1.96	1.88
三维条件下不考虑桶体转动	1.64	1.64
三维条件下考虑桶体转动	1.62	1.56

参照苏联 1986 年出版的《有关大直径薄壳码头建筑物计算与设计方法建议》标准, 其中规定薄壳结构的结构转角控制值  $0.458^\circ$  ( $0.008$  弧度), 表 1 计算稳定系数 1 时桶体转角按这个控制值取值。极限状态下, 通过数值模拟计算, 桶体转角达到  $2.48^\circ$ , 此时计算得稳定系数为表 1 中稳定系数 2。

由表 1 可以看出, 三维条件下计算的桶体稳定系数比二维条件下计算的桶体稳定系数小 13.6%。极限状态下, 考虑桶体转动后, 桶体抗滑移稳定性系数比不考虑桶体转动的桶体抗滑移稳定性系数小 5%。

#### 4 结论

由于三维情况下, 桶体长轴方向的两端为圆弧形, 而简化二维情况相当于连续的直墙, 采用三维方法比二维简化方法更接近实际情况, 因此, 极限状态下三维抗滑稳定性系数也比二维简化情况下的抗滑稳定性安全可靠。

在波浪荷载作用下, 桶体绕转动中心转动, 转动后桶体进一步向受浪侧滑移, 极限状态下桶体抗滑稳定性比不考虑转动情况下的抗滑稳定性有所降低。

#### 参考文献:

[1] 刘昌辉, 时红莲. 基础工程学[M]. 武汉: 中国地质大学

出版社, 2005.

[2] 张冬云, 马淑芝. 重力式挡土墙抗滑动稳定计算方法改进研究[J]. 岩土工程技术, 2012, 26(4): 188-191.  
 [3] 刘建起, 陈宝珠. 浅沉式大直径圆筒结构稳定性计算[J]. 天津大学学报, 1994, 27(4): 460-467.  
 [4] 王元战, 王文良. 大圆筒结构计算及工程应用[M]. 北京: 人民交通出版社, 2008.  
 [5] 王元战, 肖忠. 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.  
 [6] 竺存宏. 使用极限状态大圆筒土压力计算方法[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(3): 313-318.  
 [7] Luan M T, Sun X Y, Tang X W. Lateral bearing capacity of multi-bucket foundation in soft ground[J]. China Ocean Engineering, 2010, 24(2): 333-342.  
 [8] 范庆来. 软土地基上深埋式大圆筒结构稳定性研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2005.  
 [9] 胡中雄. 土力学与环境土工学[M]. 上海: 同济大学出版社, 1997.

( 本文编辑 武亚庆)

(上接第 39 页)

#### 参考文献:

[7] Dean R G, Browder A E, Goodrich M S, et al. Model tests of the proposed P. E. P. reef installation at Vero Beach, Florida[R]. USA: University of Florida, 1994.  
 [8] Nobuoka H, Irie I, Kato H, et al. Regulation of nearshore circulation by submerged breakwater for shore protection [C]//Proc 25th Int Conf on Coastal Eng. USA: ASCE, 1996: 2391-2403.  
 [9] 郑永红, 沈永明, 吴修广, 等. 用改进的 Boussinesq 方程模拟潜堤上的波浪变形[J]. 中国工程科学, 2004(4): 34-40.  
 [10] 陈杰, 蒋昌波, 刘虎英, 等. 潜堤对破碎区至冲泻区水动力特性影响数值分析[J]. 水科学进展, 2011, 22(3): 382-390.  
 [11] 张娜, 吴海峰, 曲淑媛, 等. 潜堤及透浪式建筑物的波浪数值模拟研究[J]. 中国港湾建设, 2009(5): 35-40.  
 [12] 陶建华. 波浪在岸滩上的爬高和破碎的数学模拟[J].

海洋学报, 1984, 6(5): 692-700.

[13] Madsen P A, Murray R, Sørensen O R. A new form of the Boussinesq equation with improved linear dispersion characteristics [J]. Coastal Engineering, 1991, 15(4): 371-388.  
 [14] Madsen P A, Sørensen O R. A new form of the Boussinesq equation with improved linear dispersion characteristics. Part 2: A slowly-varying bathymetry[J]. Coastal Engineering, 1992, 18(2): 183-204.  
 [15] Madsen P A, Sørensen O R, Schäffer H A. Surf zone dynamics simulated by a Boussinesq type model. Part I: Model description and cross-shore motion of regular waves[J]. Coastal Engineering, 1997, 32(4): 255-287.  
 [16] Ohyama T, Kioka W, Tada A. Application of numerical models to nonlinear dispersive wave[J]. Coastal Engineering, 1995, 24(S1): 297-313.

( 本文编辑 武亚庆)