

DOI:10.16198/j.cnki.1009-640X.2016.05.006

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(5): 39-46. (CAI Zheng-yin, YANG Li-gong, GUAN Yun-fei, et al. Numerical analysis of soil pressure on single bucket wall of new bucket foundation breakwater[J]. Hydro-Science and Engineering, 2016(5): 39-46.)

## 新型桶式基础防波堤单桶桶壁土压力数值分析

蔡正银<sup>1</sup>, 杨立功<sup>1,2</sup>, 关云飞<sup>1</sup>, 黄英豪<sup>1</sup>

(1. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029; 2. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092)

**摘要:** 对于软土地基上的新型桶式基础防波堤,其稳定性分析的关键是桶壁土压力分析。根据实际工程,通过数值模拟,分析了不同荷载水平、不同荷载作用点高度、不同土质状况下桶壁土压力的分布规律。分析发现,不同情况下的软土地基新型桶式基础防波堤,桶壁土压力分布区域可分为海侧圆弧端主动土压力区、两侧直壁端静止土压力区及陆侧圆弧端被动土压力区。经与理论计算的 Rankine 主动、被动土压力和静止土压力的对比分析发现,海侧主动区的土压力与陆侧被动区土压力分别介于主动土压力与静止土压力、静止土压力与被动土压力之间,两侧直壁端的桶壁土压力与静止土压力比较接近。在两端圆弧段,桶壁土压力沿深度分段线性分布,且单宽桶壁土压力合力与荷载水平呈线性关系。当荷载作用点的高度发生变化时,桶壁土压力的分布规律相类似。基于桶壁土压力的分布形式,提出了桶壁土压力的简化计算方法,为计算桶体稳定性带来方便。

**关键词:** 新型桶式基础防波堤; 桶壁土压力; 分段线性; 数值分析

**中图分类号:** U656. 2<sup>+</sup>4    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1009-640X(2016)05-0039-08

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。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,不需要加固地基土体,其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、桶壁与土体的协同工作来抵抗外力作用。因此,分析这种桶式结构桶壁土压力分布规律,是分析其稳定性的关键。

土压力理论是岩土领域研究的一个重要内容,G. W. Clough 等<sup>[1]</sup>首次采用有限元法研究挡土墙上的土压力,之后许多国内外学者<sup>[2-6]</sup>也相继采用有限元法研究土压力问题。这些研究针对的是直壁挡土墙,对于曲面形式的桶壁结构,其土压力分布要复杂得多。

由于这种桶式基础防波堤结构为新型防波堤结构,对其系统研究尚处于初步阶段。李武等<sup>[7-8]</sup>通过试验、数值模拟对其稳定性进行了分析;曹永勇<sup>[9]</sup>分析了这种桶式结构下沉过程中的稳定性,然而对桶壁土压力的研究尚未进行。类似防波堤工程中,王元战等<sup>[10-11]</sup>对筒型基础防波堤的土压力性状进行了有限元分析;蒋敏敏等<sup>[12]</sup>对箱筒型基础防波堤的土压力性状进行了有限元分析。这些研究分析仅针对圆筒结构,而对于土压力分布有所不同的直壁与圆弧壁组合的桶式结构则未涉及。

收稿日期: 2015-07-16

基金项目: 江苏省科技支撑计划(社会发展)项目(BE201370828);江苏省交通运输科技项目(2013Y20);江苏省交通运输科技项目连云港淤泥质航道和防波堤建设及维护技术研究与应用示范(2014T12)

作者简介: 蔡正银(1965—),男,江苏海安人,教授级高级工程师,博士,主要从事岩土基本理论和试验研究。

E-mail: zycail@nhri.cn

## 1 有限元模型的建立

南京水利科学研究院沈珠江院士等提出的双屈服面弹塑性模型<sup>[13]</sup>,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,采用塑性系数概念代替传统的硬化参数概念,南水模型屈服面由椭圆函数和幂函数组成。模型有 10 个参数,分别为  $c, \varphi, \Delta\varphi, K, n, K_{ur}, R_f, c_d, n_d, r_d$ ,这 10 个参数全部可以通过三轴排水试验获得。

依托连云港港徐圩港区防波堤工程,对防波堤地基土体取样进行三轴排水试验,得到的南水模型参数如表 1 所示。

表 1 各土层土性参数

Tab. 1 Properties of soil layers

土样名称	$c/\text{kPa}$	$\varphi_0$	$\Delta\varphi$	$R_f$	$K$	$K_{ur}$	$n$	$c_d$	$r_d$	$n_d$
淤泥	3	27.2	1.48	0.87	23.0	46	0.87	0.083 0	0.133	0.53
粉质黏土	2	31.5	3.40	0.7	67.5	135	0.70	0.038 3	0.350	0.73

地基土分两层,上层为淤泥,厚 9.5 m,重度为  $16.8 \text{ kN/m}^3$ ,有效内摩擦角  $6.6^\circ$ ,根据  $K_0 = 1 - \sin\varphi'$ ,静止侧压力系数取 0.885;下层为粉质黏土,厚 24.5 m,重度  $19.2 \text{ kN/m}^3$ ,有效内摩擦角  $17.5^\circ$ ,静止侧压力系数取 0.7。桶体采用线弹性模型,模型尺寸与实际工程中的相同,如图 1 所示。整个下桶埋入土中,下桶底端进入粉质黏土层 1.5 m。

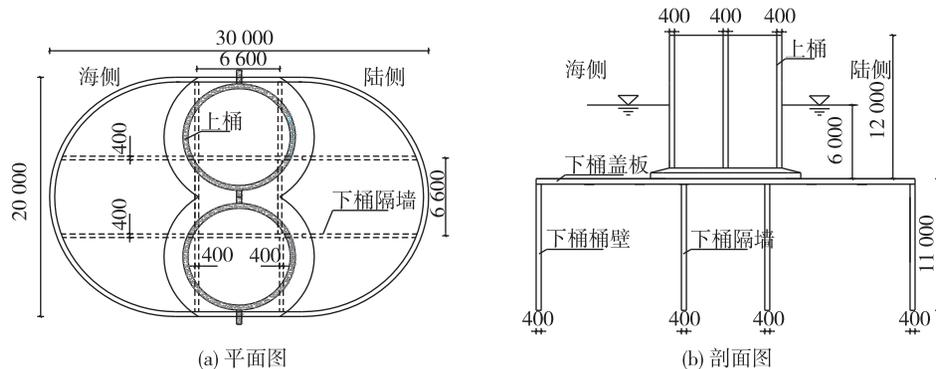


图 1 沉入式新型桶式基础防波堤结构(单位:mm)

Fig. 1 New embedded bucket foundation breakwater (unit: mm)

模型荷载采用与实际波浪荷载等效的 50 年一遇的静力波浪集中荷载  $12\,048 \text{ kN}$ ,作用在上桶桶壁,作用点距上桶底端 6 m。整个模型侧面约束短轴方向的位移,两端约束长轴方向的位移,底端约束 3 个方向的位移。根据离心机试验结果,摩擦系数取 0.115。模型长向尺寸取 5 倍桶体长径,短向尺寸取 1 倍桶体短径,深度取 3 倍下桶高度,建立的模型如图 2。

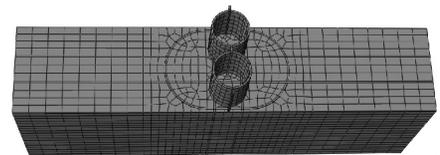


图 2 桶式基础防波堤有限元模型

Fig. 2 Finite element model for bucket foundation breakwater

## 2 位移计算结果及分析点选取

### 2.1 位移计算结果

桶壁土压力的分布与桶体位移有极大关系,桶体水平位移计算结果如图 3 所示(位移云图放大 10 倍)。波浪荷载作用下,桶体发生转动、平移及下沉,而且桶体的转动中心在桶体下部,因此,海侧桶壁土压力下降,

形成主动土压力区, 陆侧桶壁土压力上升, 形成被动土压力区。桶体位移与荷载水平、地基土体状况、荷载作用点高度等因素有关。

### 2.2 桶壁土压力点的选取

为分析桶壁土压力分布, 取桶壁周围 8 个截面, 每个截面上沿深度方向取 6 个点。另外, 为分析土压力沿桶壁环向分布, 沿桶壁圆弧段的海侧及港侧分别取  $A_1 \sim A_6$ ,  $P_1 \sim P_6$  共 12 个截面(如图 4)。

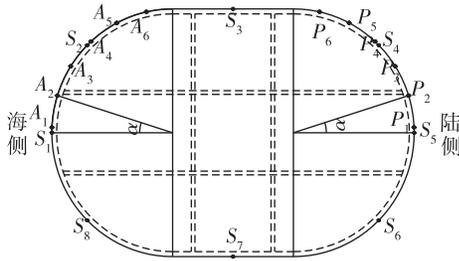


图 4 桶壁土压力分析点(单位: mm)

Fig. 4 Analysis points of soil pressure on wall of bucket (unit: mm)

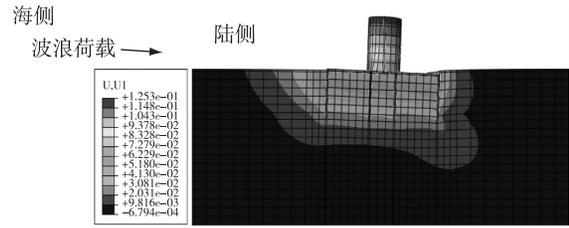
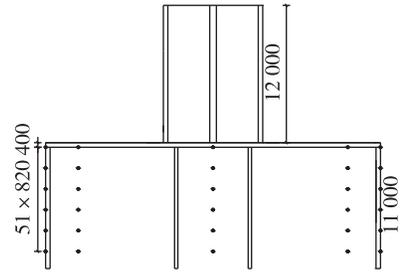


图 3 桶体位移计算结果(单位: m)

Fig. 3 Calculated results of bucket displacement (unit: m)



## 3 桶壁土压力分析

### 3.1 土压力沿桶壁的竖向分布

加载前, 桶体自重下桶壁土压力如图 5。由图 5 可见, 在桶体自重作用下, 各点土压力与静止土压力较为接近。但在桶壁上部略大于静止土压力, 在桶体底部略小于静止土压力。

50 年一遇的波浪荷载合力为  $P_{pp}$ , 施加于模型的荷载  $P$ , 当  $P/P_{pp} = 1$  时, 桶壁土压力分布如图 6。

图中  $e_0, e_a, e_p$  分别为用 Rankine 土压力理论计算的静止土压力、主动土压力和被动土压力。从图 6 可见, 海侧圆弧端  $S_1, S_2, S_8$  土压力处于主动土压力与静止土压力之间, 陆侧圆弧端  $S_4, S_5, S_6$  土压力处于静止土压力与被动土压力之间。海侧圆弧顶端  $S_1$  土压力最小, 圆弧端对称点上的  $S_2, S_8$  土压力相等; 两侧直壁端  $S_3, S_7$  土压力相等, 与静止土压力较为接近; 陆侧圆弧顶端  $S_5$  土压力最大, 圆弧端对称点(长轴方向中轴面)  $S_4, S_6$  土压力相等。

在桶壁上部 0~2.22 m 范围内, 土压力沿深度增加均较慢, 桶壁中部 2.22~7.68 m 之间, 桶壁土压力沿深度线性增加, 增加速率大致与静止土压力增加速率相等, 在桶壁下部 7.68~9.50 m 范围内, 海侧及直壁侧土压力增加速率减小, 陆侧桶壁土压力增加速率增大。

这种桶式基础防波堤桶壁土压力分布形式与大圆筒结构筒壁土压力分布相差较大<sup>[10-11, 14]</sup>。由于桶体的转动中心在桶体下部土体内, 而大圆筒基础的转动中心在筒体内部, 在水平荷载作用下, 桶式基础所有部位都发生不同程度的前移并发生转动, 因此, 在海侧桶体整

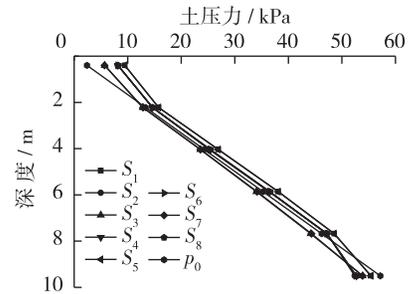


图 5  $P/P_{pp} = 0$  时桶壁土压力竖向分布

Fig. 5 Vertical soil pressure distribution on bucket wall when  $P/P_{pp} = 0$

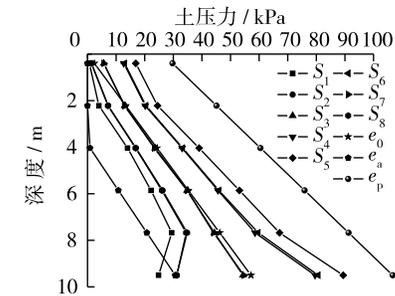


图 6  $P/P_{pp} = 1$  时桶壁土压力竖向分布

Fig. 6 Vertical soil pressure distribution on bucket wall when  $P/P_{pp} = 1$

个桶壁土压力小于静止土压力,陆侧桶体整个桶壁土压力大于静止土压力。另外,由于下桶内部有较多隔墙,整体刚度很大,在软土中,桶壁变形很小,致使桶壁土压力分段线性分布。这种分布方式与周健等<sup>[15]</sup>进行的不同位移模式下挡土墙土压力分析中 RBT 模式较为接近。

不同荷载水平下,桶壁土压力分布如图 7 所示。可以看出,不同荷载水平下,桶壁土压力分布类似,在桶壁上部长速率较静止土压力慢,在桶体中部增长速率与静止土压力接近,在桶体下部,主动侧土压力减小,被动侧土压力增长速率较静止土压力大。土压力沿深度分布为分段线性分布,在海侧的圆弧端为主动区,陆侧圆弧端为被动区,两侧直壁段为静止土压力区。

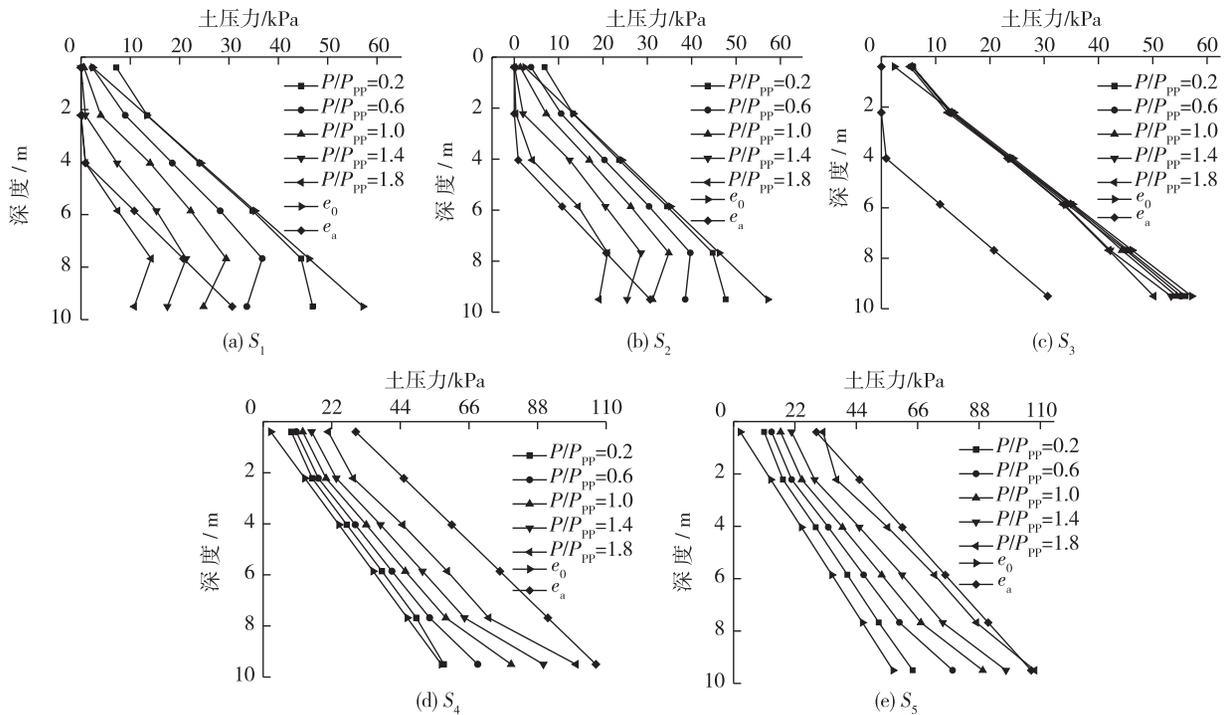


图 7 不同荷载水平下不同截面的桶壁土压力

Fig. 7 Vertical soil pressure distribution on different sections under different load levels

在同一荷载水平下,  $e_a < p_{s1} < p_{s3}$ ,  $e_0 < p_{s5} < e_p$  ( $p_{si}$  为  $S_i$  截面上的桶壁土压力), 即海侧桶壁圆弧顶端土压力最小,沿圆弧段向桶体两侧直壁段逐渐增加至静止土压力,陆侧圆弧顶端桶壁土压力最大,沿圆弧段向桶体两侧直壁段减小至静止土压力。

前述分析的桶壁土压力分段线性、土压力沿深度分布有两个转折点,可从  $S_1, S_5$  两竖向截面上几个土压力点的应力路径看出。在主动侧的  $S_1$  截面上,在桶体上部,  $q$  减小,  $p$  增大;在桶体中部,  $q$  增大,  $p$  减小,且整体上随深度增大,  $p$  增大;在桶体下部,  $q$  增大,  $p$  减小,且整体上随深度增大,  $p$  减小。在被动侧的  $S_5$  截面上,沿深度方向整个桶壁  $p$  增大时,  $q$  增大,但在桶体上部,  $p$  增加速率较大,在桶体底部,  $q$  增加速率增大。

对于桶壁上部土体,由于其自身的竖向应力较小,当桶体受到水平荷载作用时,上部土体容易发生变形,土体应力状态容易发生改变;对于桶壁下部土体,一方面受桶壁竖向摩擦阻力的积累作用,海侧竖向土压力会有所降低,陆侧竖向土压力有所增加,另一方面由于上覆土压力较大,土体变形较小,在水平荷载下偏应力增加较大,土体应力状态也会发生较大变化。

单宽桶壁土压力水平与荷载水平之间的关系如图 8 所示。图中  $e_0$  为

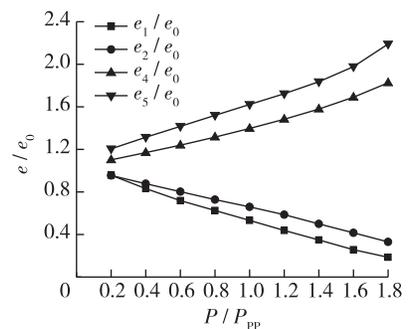


图 8  $e/e_0$  与  $P/P_{pp}$  的关系

Fig. 8 Relationships between  $e/e_0$  and  $P/P_{pp}$

静止土压力合力,  $e_i$  为  $i$  点的土压力合力。  $e_i/e_0$  为土压力水平, 可以看出, 荷载水平不是特别高的情况下, 土压力水平与荷载水平之间的线性关系较好。

### 3.2 土压力沿桶壁的环向分布及桶壁土压力简化计算

由于桶体几何形式及受力状况对称, 取桶体一侧一半的圆弧段进行分析, 如图4所示。桶体长轴与土压力点的夹角为  $\alpha$ , 当  $P/P_{pp} = 1$  时, 桶壁单宽土压力水平与荷载水平大致呈线性关系, 则假定:

$$E_1 = k_1(P/P_{pp})e_0 + C_1 \tag{1}$$

当  $P/P_{pp} = 0$  时,  $e_1 = e_0$ , 则  $C_1 = e_0$ , 当  $P/P_{pp} = \eta_1$  时,  $e_1 = e_a$ , 则:

$$e_1 = P/(\eta_1 P_{pp})(e_a - e_0) + e_0 \tag{2}$$

$$e_5 = k_5(P/P_{pp})e_0 + C_5 \tag{3}$$

当  $P/P_{pp} = 0$  时,  $e_5 = e_0$ , 则  $C_5 = e_0$ , 当  $P/P_{pp} = \eta_5$  时,  $e_5 = e_p$ , 则:

$$e_5 = P/(\eta_5 P_{pp})(e_p - e_0) + e_0 \tag{4}$$

当波浪荷载反向作用时, 可得:

$$e_5 = -\frac{\eta_1}{\eta_5} \frac{P}{P_{pp}}(e_p - e_0) + e_0 = e_a \tag{5}$$

$$\frac{\eta_1}{\eta_5} = (e_0 - e_a)/(e_p - e_0) \tag{6}$$

式中:  $\eta_1, \eta_5$  分别是海侧圆弧顶端桶壁土压力为主动土压力、陆侧圆弧顶端桶壁土压力为被动土压力时的荷载水平, 与桶体自身特点、土质特性及波浪荷载合力作用点位置有关, 可通过模型试验或数值模拟确定。

圆弧段桶壁单宽土压力与  $\cos\alpha$  大致呈线性关系, 因此, 根据式(2)和(4)可得出在主动及被动侧圆弧段上任一单宽桶壁土压力合力为:

$$E_{a\alpha} = \eta_1(P/P_{pp})(e_0 - e_a) \cos\alpha + e_0 \tag{7}$$

$$E_{p\alpha} = \eta_5(P/P_{pp})(e_p - e_0) \cos\alpha + e_0 \tag{8}$$

式中:  $\alpha$  为下桶长轴与圆弧端上任意一点的夹角, 如图4所示。当  $\alpha = 0$  时, 式(7)和(8)分别表示桶体两侧圆弧顶端单宽主动及被动土压力合力, 当  $\alpha = \pm\pi/2$  时, 上式分别表示桶体直壁端两侧土压力。

由图7可以看出, 在不同荷载水平下, 土压力沿桶壁的竖向分布为分段折线形式, 而且不同荷载水平下土压力转折点的深度相同。为方便表述, 将桶壁沿深度分为3个区域:  $h \leq h_1, h_1 < h \leq h_2, h_2 < h \leq h_3$ , 如图9所示。图9中,  $h_1, h_2$  分别表示两个土压力转折点的深度,  $h_3$  为桶壁深度;  $h_{10}, h_{50}$  分别表示将  $e_1, e_5$  分段土压力等效成直线分布后土压力零点的深度;  $e_{10}, e_{50}$  分别表示将  $e_1, e_5$  分段土压力等效成直线分布后的土压力;  $k_1, k_2, k_3, k_4$  分别表示  $e_1, e_5$  分段土压力的斜率,  $k$  表示静止土压力的斜率。

在主动侧:  $e_{10}$  代替  $e_1, e_{10}$  的斜率与静止土压力相等, 如图9所示。由力与弯矩等效条件可得:

$$h_{10} = h - \sqrt{2e_1 k} \tag{9}$$

在被动侧: 同样, 由  $e_{50}$  代替  $e_5, e_{50}$  的斜率与静止土压力相等, 由力与弯矩等效条件可得:

$$h_{50} = h - \sqrt{2e_5 k} \tag{10}$$

式中:  $k = 1/\gamma, \gamma$  为土的重度。

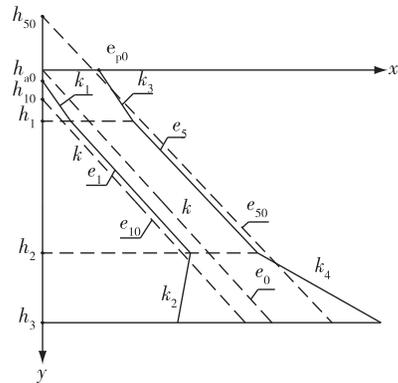


图9 桶壁土压力分布简化示意  
Fig.9 Distribution diagram of soil pressure on bucket wall

### 3.3 荷载作用点高度对土压力的影响

$P/P_{pp} = 1$ , 波浪荷载作用点高度变化时, 桶壁土压力分布如图 10~11 所示。由图 10 可见, 随荷载作用点高度的增加, 主动侧土压力减小, 被动侧土压力增加, 且是分段线性, 这与  $H$  为定值、荷载水平变化时类似。由图 11 可见, 当  $H < 6$  m 时, 被动区单宽桶壁土压力水平与荷载水平呈线性关系, 在主动区, 荷载作用点在整个桶壁范围内变化时, 单宽桶壁土压力水平与荷载水平呈线性关系。且荷载作用点位置越高, 直线斜率绝对值越大。

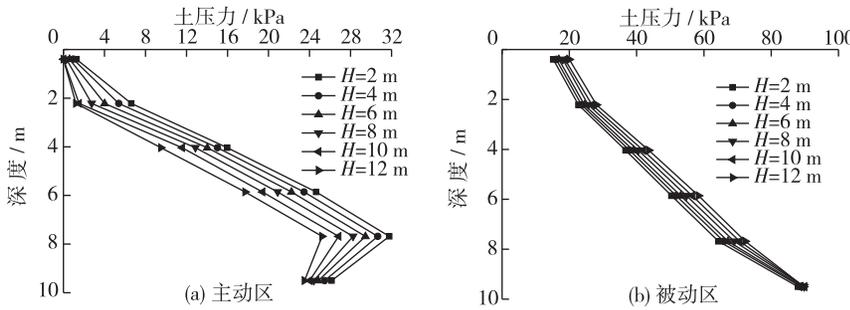


图 10 不同荷载作用高度时主动区土压力分布

Fig. 10 Soil pressure distribution in active and passive regions under different heights of load application points

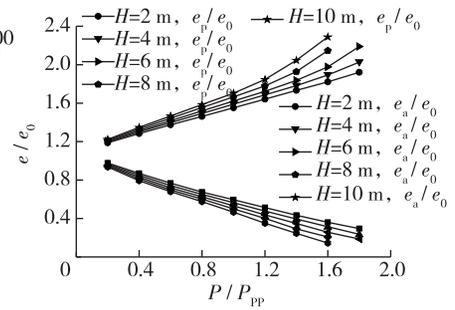


图 11 单宽桶壁土压力水平与荷载水平关系

Fig. 11 Relationships between  $P/P_{pp}$  and  $e/e_0$ .

### 3.4 不同土质条件对土压力的影响

为探讨土质状况对桶壁土压力的影响, 取淤泥土、粉质黏土、细砂土 3 种土进行分析, 并采用南水模型进行计算, 计算结果见图 12 和 13。由图 12 可以看出, 对于淤泥土与粉质黏土, 桶壁土压力可看作是分段线性的; 对于砂土, 在主动区, 桶壁中上部土压力为零, 在桶壁下部分段线性, 在被动区, 桶壁土压力非线性较明显。由图 13 可见, 对于淤泥土与粉质黏土, 桶壁单宽土压力水平与荷载水平大致呈线性关系; 对于砂土, 在主动区, 单宽土压力与荷载水平呈非线性关系, 在被动区, 单宽土压力与荷载水平呈线性关系。

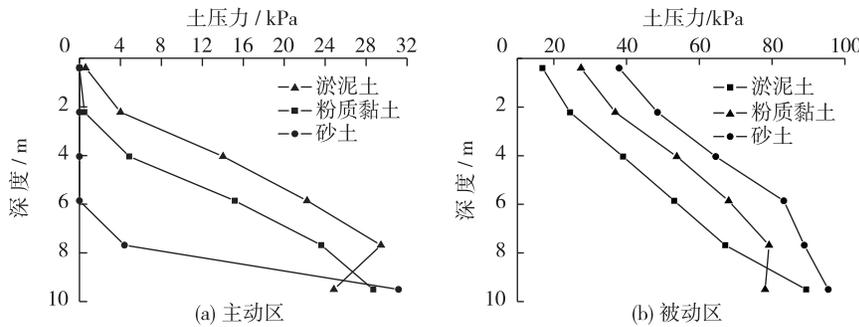


图 12 不同土质状况时土压力分布

Fig. 12 Soil pressure distributions of different soils

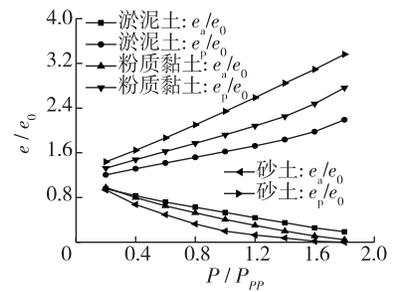


图 13 单宽桶壁土压力水平与荷载水平关系

Fig. 13 Relationships between  $P/P_{pp}$  and  $e/e_0$ .

## 4 结 语

(1) 新型桶式基础防波堤桶壁土压力分布范围可分为海侧圆弧端主动土压力区、两侧直壁段静止土压力区、陆侧圆弧端被动土压力区。

(2) 对于软土地基上的新型桶式基础防波堤,其桶壁土压力分布是分段线性的,荷载水平、荷载作用点高度只影响桶壁土压力大小,不影响分布形式。

(3) 对于软土地基上的新型桶式基础防波堤,其桶壁圆弧顶端单宽土压力合力与荷载水平呈线性关系,桶壁土压力分布可简化为直线分布。对于圆弧顶端与直壁段之间的圆弧桶壁,其单宽土压力合力与夹角余弦值呈线性关系。

## 参 考 文 献:

- [1] CLOUGH G W, DUNCAN J M. Finite element analysis of retaining wall behavior [J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundation, ASCE, 1971, 97(SM12): 1657- 1673.
- [2] NAKAI T. Finite element computations for active and passive earth pressure problems of retaining wall [J]. Soils and Foundations, 1985, 25(3): 99- 112.
- [3] 陈页开. 挡土墙上土压力的试验研究与数值分析 [D]. 杭州: 浙江大学, 2001. (CHEN Ye-kai. Testing study and numerical analysis of earth pressures on retaining wall [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2001. (in Chinese))
- [4] 王多垠, 吴友仁, 周世良. 高大扶壁式挡土墙墙后土压力特性有限元分析 [J]. 中国港湾建设, 2006(2): 14- 17. (WANG Duo-yin, WU You-ren, ZHOU Shi-liang. Analysis of behaviors of earth pressure behind counterfort retaining wall with finite element method [J]. China Harbour Engineering, 2006(2): 14- 17. (in Chinese))
- [5] 陈页开, 汪益敏, 徐日庆, 等. 刚性挡土墙被动土压力数值分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(6): 980- 988. (CHEN Ye-kai, WANG Yi-min, XU Ri-qing, et al. Numerical analysis of passive earth pressure on rigid retaining wall [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(6): 980- 988. (in Chinese))
- [6] 陈页开, 汪益敏, 徐日庆, 等. 刚性挡土墙主动土压力数值分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(6): 989- 995. (CHEN Ye-kai, WANG Yi-min, XU Ri-qing, et al. Numerical analysis of active earth pressure on rigid retaining wall [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(6): 989- 995. (in Chinese))
- [7] 李武. 新型桶式基础防波堤与地基动力相互作用研究 [D]. 南京: 南京水利科学研究所, 2014. (LI Wu. Research of interaction of new bucket-based structure and ground in dynamic loading [D]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2014. (in Chinese))
- [8] 李武, 陈甦, 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(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(5): 14- 18. (in Chinese))
- [9] 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))
- [10] 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))
- [11] 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. (FAN Qing-lai. A study of stability deeply embedded large-diameter cylindrical structure in soft ground [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2005. (in Chinese))
- [12] 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 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. (in Chinese))
- [13] 沈珠江. 考虑剪胀性的土和石料的非线性应力应变模式 [J]. 水利水运科学研究, 1986(4): 1- 14. (SHEN Zhu-jiang. A nonlinear dilatant stress- strain model for soils and rock materials [J]. Journal of Nanjing Hydraulic Research Institute, 1986(4): 1- 14. (in Chinese))
- [14] 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): 667- 672. (SUN Xi-yuan, LUAN Mao-tian, TANG Xiao-wei. A study of horizontal bearing capacity of bucket foundation on saturated soft clay ground [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(2): 667- 672. (in Chinese))

- [15] 周健, 高冰, 彭述权. 不同位移模式下挡土墙模型试验及数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(增2): 3721-3727. (ZHOU Jian, GAO Bing, PENG Shu-quan. Model test and numerical simulation of retaining wall under different displacement modes[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(Suppl2): 3721-3727 (in Chinese))

## Numerical analysis of soil pressure on single bucket wall of new bucket foundation breakwater

CAI Zheng-yin<sup>1</sup>, YANG Li-gong<sup>1,2</sup>, GUAN Yun-fei<sup>1</sup>, HUANG Ying-hao<sup>1</sup>

(1. *Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China*; 2. *Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China*)

**Abstract:** The key analysis of the stability of the new bucket foundation breakwater on soft foundation is the analysis of the soil pressure on the bucket wall. According to the practical works and by means of numerical analysis, the soil pressure distribution on the bucket wall is analyzed for different load levels, different heights of load application points and different soils in this study. By analyzing, it is found that in different conditions the soil pressure on the bucket wall can be divided into the active region on the circle end of the sea side, the static region on the straight side and the passive region on the circle end of the land side for the new bucket foundation breakwater on soft ground. Comparing with the theoretical Rankine active earth pressure, passive earth pressure and static earth pressure, on sea side, the earth pressure in the active region ranges from active earth pressure to static earth pressure, while on the land side, the earth pressure in the passive region ranges from static earth pressure to passive earth pressure. On the straight wall of the two flanks of the bucket, the earth pressure is approximate to the static earth pressure. For the new bucket foundation breakwater on soft foundation, on the two circle ends of the bucket, the distribution of the soil pressure is stepped linearly along the depth direction, and the relationship is linear between the per breadth resultant of soil pressure and load levels, and when the height of load application points changes, the law of the distribution of the soil pressure is similar. According to the distribution patterns of the earth pressure on the bucket wall, a simplified calculation method is given in this study, and the analysis of the stability of the bucket will become more convenient.

**Key words:** new bucket foundation breakwater; soil pressure on the bucket wall; stepped linearly; numerical simulation