

DOI: 10.11779/CJGE201604021

新型桶式基础防波堤桶体阻力分析

杨立功^{1, 2}, 蔡正银², 徐志峰³

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

3. 江苏科兴项目管理有限公司, 江苏 南京 210021)

摘要: 包括桶壁、隔墙摩阻力和桶底端阻力的桶体阻力是维持桶体稳定性的一个重要因素。外侧桶壁摩阻力与桶土相对位移及接触状态有关, 内侧桶壁和隔墙摩阻力与桶土相对位移有关, 桶底端阻力与桶土接触状态有关。波浪荷载作用下, 海侧上部的外侧桶壁与土体脱离, 下部产生相对土体的向上位移, 陆侧桶壁则相反; 海侧内侧桶壁与隔墙产生相对桶内土体的向上位移, 陆侧则相反; 海侧桶体底部与土体脱离, 陆侧则挤压土体。波浪荷载作用下, 在绕桶体转动中心发生向上位移的迎浪侧, 随荷载水平增加, 桶壁与隔墙摩阻力由桶体自重作用下的正摩阻力减小变为负摩阻力, 桶底端阻力则减小直至为零; 在绕桶体转动中心发生向下位移的背浪侧, 桶体阻力在桶体自重的基础上增加。

关键词: 新型桶式基础防波堤; 摩阻力; 端阻力

中图分类号: TU44

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2016)04-0747-08

作者简介: 杨立功 (1982-), 男, 河南信阳人, 博士研究生, 主要从事结构与土的相互作用研究。E-mail: 65481875@qq.com。

Numerical analysis of bucket resistance of new bucket foundation breakwater

YANG Li-Gong^{1, 2}, CAI Zheng-yin¹, XU Zhi-feng³

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 3. Jiangsu Kexing Engineering Construction Supervision Co., Nanjing 210021, China)

Abstract: The resistance including the frictional resistance on the bucket wall and the partition wall and the end resistance at the bottom of the bucket is an important factor to maintain the stability of the bucket. The frictional resistance on the outside bucket wall is connected with the relative displacement and the contact status between the bucket and the soil. The frictional resistance on the inside bucket wall and the partition wall relates with the relative displacement between the bucket and the soil, while the end resistance at the bottom of the bucket is connected with the contact status between the bucket and the soil. Under wave loads, the upper outside bucket wall breaks away from the soil, and the lower bucket wall generate upward displacement against the soil at the sea side, while the bucket wall at the land side is opposite. At the same time, the inside bucket wall and the partition wall generates upward displacement at the sea side against the soil, and the situation is opposite at the land side, while the bottom breaks away from the soil at the sea side and it compresses the soil at the land side. At the head side of the waves where an upward displacement is generated around the rotating center of the bucket, the frictional resistance on the bucket wall and the partition wall changes from the positive frictional resistance under self-weight to the negative one, and the end resistance at the bottom of the bucket reduces until to zero. At the same time, at the reverse side of the waves where a downward displacement is generated around the rotating center of the bucket, the resistance of the bucket increases based on its self-weight.

Key words: new bucket foundation breakwater; frictional resistance; end resistance

0 引言

随着中国港口建设的发展, 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制约。为此, 无底、下部带9个隔舱的近椭圆形薄壁下桶、上部为薄壁双圆筒组合上桶的新型桶式基础防波堤开始用于港口工程中, 如图1所示。

这种防波堤不需要对地基土体加固, 其稳定性完全通过海底土体的嵌固作用来维持, 也就是是靠其自重、下桶桶壁、桶底与桶外土体、桶内土体的协同工

基金项目: 江苏省科技计划项目 (BE201370828); 江苏省交通运输科技项目 (2013Y20); 南京水利科学研究院院基金项目 (Y315010)

收稿日期: 2015-04-24

作来抵抗外力的。

桶体稳定性不光靠其自重及桶壁土压力来维持,桶壁摩阻力及桶底端阻力也是维持其稳定性的一个重要因素。王元战等^[1-3]、范庆来^[4]、吴梦喜^[5]、肖忠等^[6]在进行大圆筒稳定性及承载能力分析时,筒体摩阻力都采用 API 规范方法简化计算。徐光明等^[7]通过对沉入式大圆筒结构的离心机试验研究,对筒壁界面光滑、一般粗糙及比较粗糙几种情况进行分析,比较粗糙情况下比光滑情况下筒体水平位移降低 24.6%。王元战等^[8-9]、迟丽华等^[10]在大圆筒位移计算分析时,对筒壁的摩阻力,采用文克尔地基模型,但对于竖向变形剪切系数,引入了一个随深度变化的比例因子。

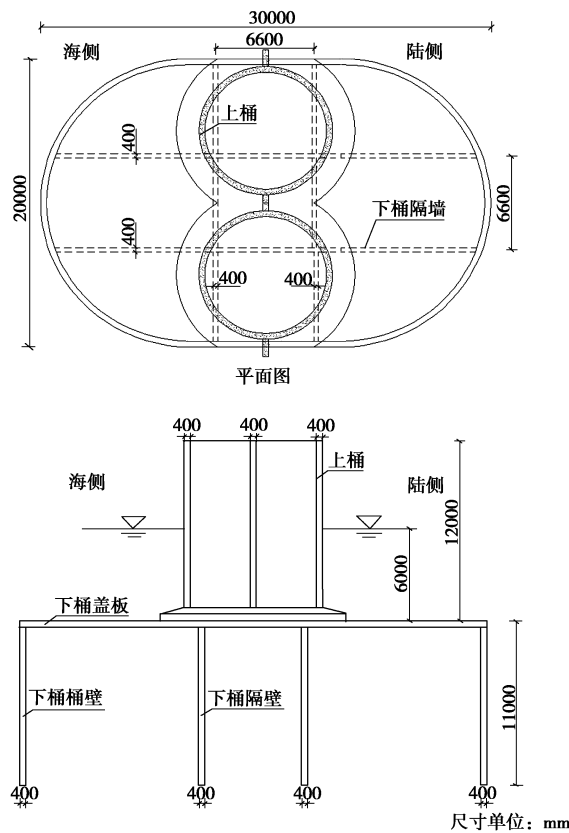


图 1 沉入式新型桶式基础防波堤结构

Fig.1 Embedded new bucket foundation breakwater

桶体阻力与桶土相对位移有极大关系,简单统一地取极限值或引入一个单一的比例系数并不能很好地反映阻力对桶体稳定性的影响及贡献。因此,有必要对桶体各部位的阻力做系统分析,以保证桶体稳定性分析更加精确。

1 有限元模型的建立

沈珠江等提出的双屈服面弹塑性模型(南水模型),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,采用塑性系数的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 , φ_0 , $\Delta\varphi$, K , n , K_{ur} , R_f , c_d , r_d , n_d , 这 10 个参数全部可以通过三轴排水试验获得(见表 1)。 c , φ_0 , $\Delta\varphi$ 为强度指标, $\varphi = \varphi_0 - \Delta\varphi \lg(\sigma_3/p_a)$; R_f 为破坏比; K_{ur} 分别表示回弹模量; K , n 为试验常数; c_d 为 $\sigma_3 = p_a$ 时的最大收缩体应变; r_d 表示产生最大体缩时所对应的偏应力比; n_d 表示收缩体应变随 σ_3 的增加而增加的幂次。

表 1 各土层土性参数

Table 1 Properties of soil layers

土样名称	c /kPa	φ_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	0.0830	0.133	0.53
粉质黏土	2	31.5	3.40	0.7	67.5	135	0.70	0.0383	0.35	0.73

利用 ABAQUS 有限元分析软件,建立桶体模型如图 2 所示。模型长向取 5 倍下桶长径,短向取 1 倍桶体下桶短径,模型沿深度方向取 3 倍下桶高度。

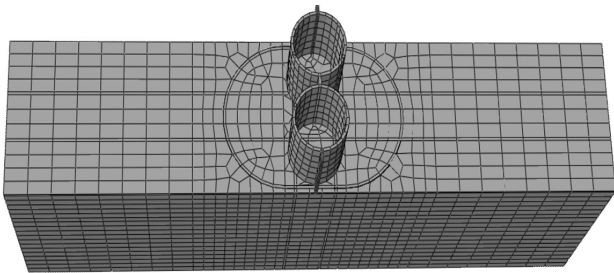


图 2 桶式基础防波堤有限元模型

Fig. 2 Finite element model for bucket foundation breakwater

地基土分两层:上层为淤泥,厚 9.5 m,浮重度 6.8 kN/m³,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,浮重度 9.2 kN/m³,静止侧压力系数取 0.7。

桶体采用线弹性模型,上桶高 12 m,下桶高 11 m。整个下桶完全沉入地基土体中,桶体底端进入粉质黏土层 1.5 m,上桶在地基土顶面以上,起挡浪作用。因此,本文所分析的桶体阻力指下桶桶体阻力。

模型荷载采用与实际波浪荷载等效的 50 a 一遇的波浪集中荷载 12048 kN,作用在上桶桶壁,作用点距下桶顶部 6 m。

桶体与土体之间采用 Coulomb 摩擦,根据离心机试验结果,摩擦系数取 0.115。为分析在波浪荷载作用下,桶土接触状态对桶体阻力的影响,桶体单元与土体单元的接触行为设置成可分离模式。

2 计算结果及分析点的选取

2.1 计算结果

在 50 a 一遇的波浪集中荷载作用下,桶体位移计算结果如图 3 所示。由于在波浪荷载作用下,桶体发

生转动、平移及下沉, 海侧的外侧桶壁上与桶体脱离, 桶体底部与土体脱离, 外侧桶壁的中下部、内侧桶壁及隔墙产生相对于土体的向上位移; 在陆侧, 桶壁、隔墙及桶体底端均不同程度地挤压土体。

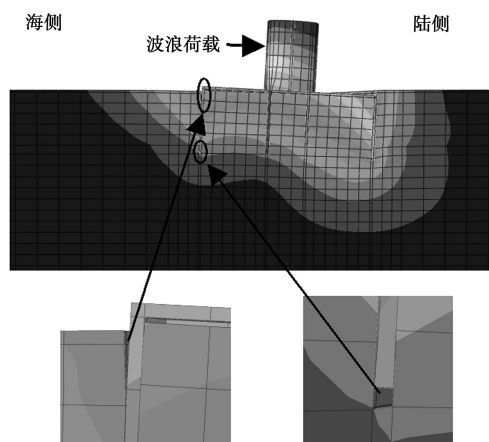


图3 桶体位移计算结果

Fig. 3 Results of bucket displacement

2.2 分析点的选取

为分析桶体阻力, 取外侧桶壁结构面的 O1~O5、内侧桶壁结构面上的 I1~I5、隔墙结构面上的 W1~W6、桶体底端的 B1~B11 进行分析, 如图 4 所示。桶壁及隔墙沿深度在每个截面上取 6 个分析点, 即从下桶顶部以下的 0.40~9.50 m (盖板厚 0.4 m) 每隔 1.82 m 取一个点进行分析。由于桶体及荷载情况对称, 只在一半的桶体上选取分析点。

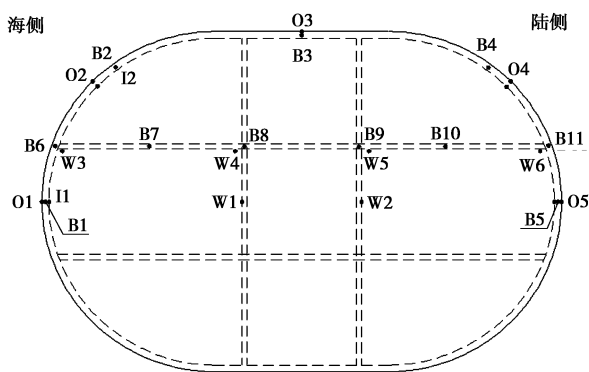


图4 桶体阻力分析点

Fig. 4 Analysis points of bucket resistance

3 外侧桶壁摩阻力分析

加载前, 桶体自重下外侧桶壁摩阻力如图 5 所示。

在桶体自重作用下, 桶壁摩阻力随深度增加, 但单位深度摩阻力增加量也随深度增加。桶壁上土体在桶体自重下, 随桶体一起下沉, 桶土相对位移较小, 桶壁摩阻力随深度增长较慢; 桶壁下部土体在桶体自重作用下, 被桶体排挤上移, 桶土相对位移较大, 桶壁摩阻力随深度增长较快。

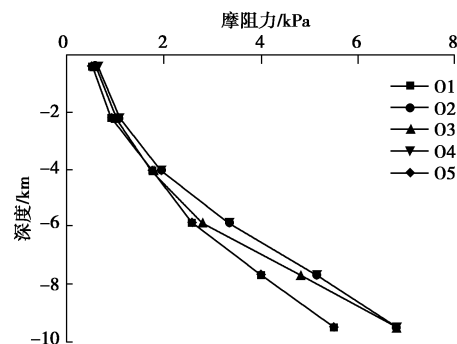


图5 $P/P_{pp}=0$ 时桶壁摩阻力竖向分布

Fig. 5 Distribution of vertical resistance on bucket wall when $P/P_{pp}=0$

50 a 一遇的波浪荷载合力为 P_{pp} , 施加在模型上的荷载 P , 当 $P/P_{pp}=1$ 时, 桶壁摩阻力分布如图 6 所示。在波浪荷载 P_{pp} 作用下, 海侧桶壁摩阻力均向下, 且在桶壁中上部, 桶壁摩阻力随深度增加, 在桶壁下部, 桶体底端脱离土体, 桶壁下部土体围压减小, 桶壁摩阻力随深度减小, 如 O1、O2 所示。在整个桶体深度范围内, 陆侧桶壁摩阻力随深度增加, 由于在波浪荷载作用下, 桶体发生水平位移及转动, 桶壁下部土体受桶体挤压, 桶壁摩阻力呈非线性增长, 如 O4、O5 所示。在桶体两侧的直壁段中部, 桶壁摩阻力随深度的增长比较接近线性, 如 O3 所示。

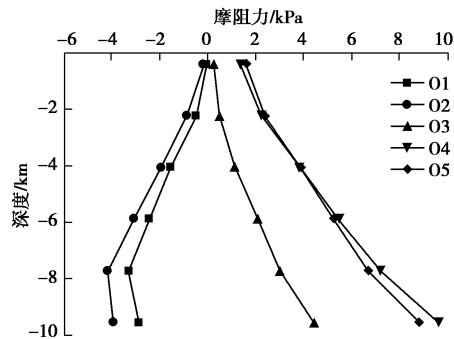


图6 $P/P_{pp}=1$ 时桶壁摩阻力竖向分布

Fig. 6 Distribution of vertical resistance on bucket wall when $P/P_{pp}=1$

不同荷载水平下, 桶壁摩阻力随深度变化如图 8~12 所示。在 O1 处, 荷载水平不高的情况下, 随荷载水平增加, 桶体前端土体下沉挤压桶体, 海侧桶壁摩阻力减小至反向增长, 当荷载水平较高时 ($P/P_{pp} > 0.6 \sim 0.8$), 桶体前移量较土体大, 桶壁土压力减小, 桶壁摩阻力进而减小, 如图 8 所示。从图 8 中可以看出, 当荷载水平 $P/P_{pp} > 0.4$ 时, O1 截面上顶部 0.4 m 范围内, 桶壁摩阻力已为零, 桶体与土体已脱离, 分别取桶、土接触面上 0.4m 深度处的单元节点, 得到的桶、土位移如图 7 所示。

与顶端 O1 相似, 在圆弧段的 O2 处, 桶壁摩阻力

的变化规律随荷载水平增加, 由自重状态下的正摩阻力逐渐减小转变成负摩阻力, 在 $P/P_{pp} > 1.0$ 时, 桶壁负摩阻力进而减小, 如图 9 所示。

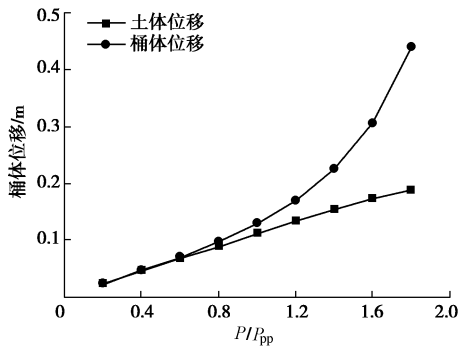


图 7 海侧 0.40 m 处桶体与土体水平位移

Fig. 7 Horizontal displacements of bucket and soil at sea side
0.40 m in depth

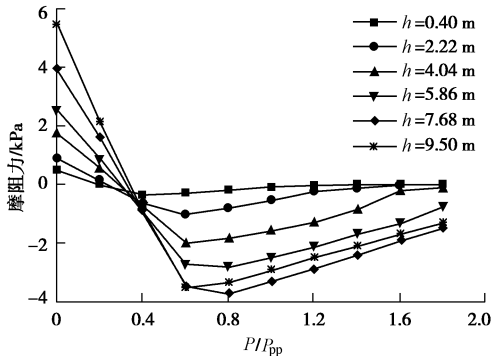


图 8 不同荷载水平下 O1 桶壁摩阻力竖向分布

Fig. 8 Distribution of vertical resistance on O1 under different
values of P/P_{pp}

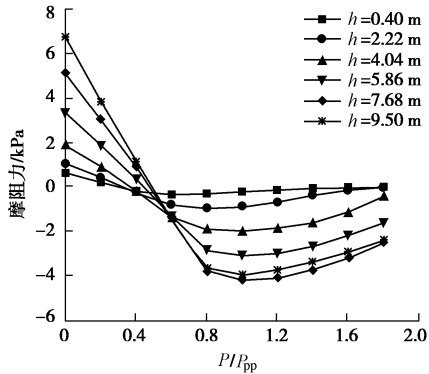


图 9 不同荷载水平下 O2 桶壁摩阻力竖向分布

Fig. 9 Distribution of vertical resistance on O2 under different
values of P/P_{pp}

在侧面直壁段的 O3 处, 低荷载水平下, $P/P_{pp} < 0.6$, 桶壁摩阻力变化很小, 当 $P/P_{pp} > 0.6$ 时, 桶壁摩阻力减小, 当 $P/P_{pp} > 1.4$ 时, 桶壁摩阻力反向, 如图 10 所示。直壁段桶壁摩阻力的变化规律与桶体的转动中心有关, 在低荷载水平下, 桶体转动中心在靠近海侧的桶体底平面以下土体内, 当荷载水平增加时, 桶

体转动中心向桶体底平面正下方移动, 在高荷载水平下, 桶体绕转动中心转动, 直壁段桶壁相对土体向上位移。

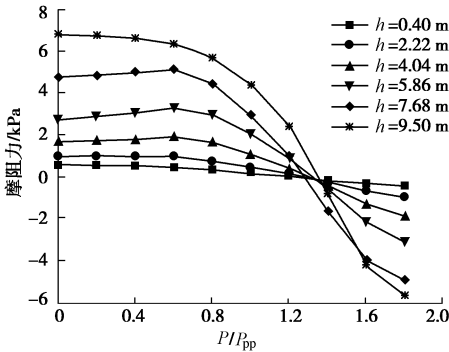


图 10 不同荷载水平下 O3 桶壁摩阻力竖向分布

Fig. 10 Distribution of vertical resistance on O3 under different
values of P/P_{pp}

在陆侧圆弧段 O4、O5 处, 桶壁摩阻力随荷载水平增加而增加, 但桶体下部桶壁摩阻力随荷载水平增加幅度较大, 如图 11, 12 所示。由图 13 可以看出, 由于桶体端部刺入土体, 桶土竖向相对位移较大, 上部土体被桶体斜向下挤压并被带入下沉, 桶土竖向相对位移较小, 如图 13 所示, 因此, 桶壁下部摩阻力发挥较充分, 桶壁摩阻力随荷载水平的增加而增加的规律较明显。

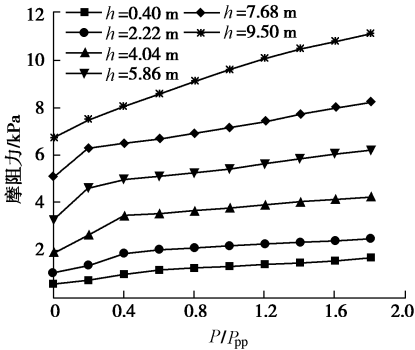


图 11 不同荷载水平下 O4 桶壁摩阻力竖向分布

Fig. 11 Distribution of vertical resistance on O4 under different
values of P/P_{pp}

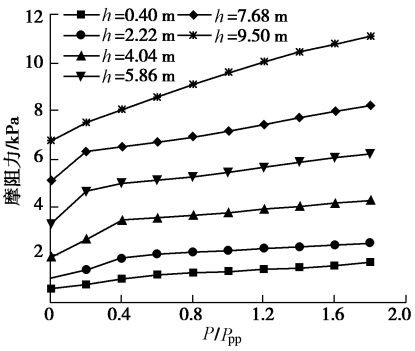


图 12 不同荷载水平下 O5 桶壁摩阻力竖向分布

Fig. 12 Distribution of vertical resistance on O5 under different
values of P/P_{pp}

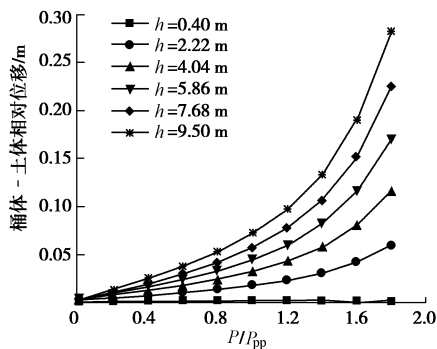


图 13 陆侧桶体顶端桶体 - 土体竖向相对位移

Fig. 13 Relative vertical displacement between bucket and soil at top end of landside bucket

4 内部桶壁摩阻力分析

4.1 内侧桶壁摩阻力分析

加载前, 桶体自重下桶壁土压力如图 14 所示。在桶体自重作用下, 内侧桶壁摩阻力与外侧桶壁摩阻力随深度变化规律类似, 但桶壁下部摩阻力变化比上部较为剧烈, 这主要由于桶内土体受桶体约束, 桶内上部土体变形较小, 桶土相对位移较小。在下部, 一方面由于桶体刺入土体, 另一方面由于土体压缩变形, 桶土相对位移较大, 桶壁摩阻力也稍大。

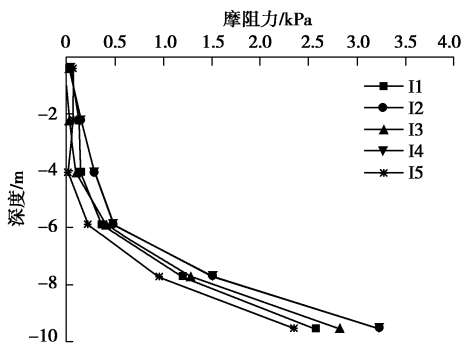


图 14 $P/P_{pp}=0$ 时桶壁摩阻力竖向分布

Fig. 14 Distribution of vertical resistance on bucket wall when

$P/P_{pp}=0$

$P/P_{pp}=1$ 时, 桶壁内侧摩阻力分布如图 15 所示。

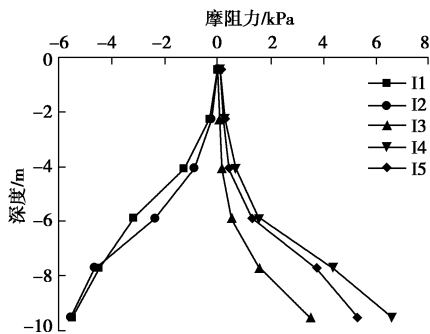


图 15 $P/P_{pp}=1$ 时桶壁土压力竖向分布

Fig. 15 Distribution of vertical resistance on bucket wall when

$P/P_{pp}=1$

在 50 a 一遇的波浪荷载下, 海侧桶内土体脱出, 相对桶体向下位移, 内侧桶壁负摩阻力均随深度增加而增加; 陆侧桶内土体受挤压, 相对桶体向上位移, 内侧桶壁正摩阻力随深度增加而增加; 在侧面直壁段中部, 由于桶体整体转动下沉, 桶壁正摩阻力随深度增加而增加。

不同荷载水平下, 内侧桶壁摩阻力如图 16~20 所示。在海侧, 如图 16、17 所示, 随荷载水平增加, 桶体内侧桶壁土压力由正转负。在圆弧段顶端的 I1 处, 当荷载水平 $P/P_{pp}=0.4$ 时, 桶壁摩阻力由正转负, 且当荷载水平 $P/P_{pp}>1.2$ 时, 桶壁摩阻力变化很小; 在圆弧段中间, 当荷载水平 $P/P_{pp}=0.6$ 时, 桶壁摩阻力由正转负, 且当荷载水平 $P/P_{pp}>1.4$ 时, 桶壁摩阻力变化很小。

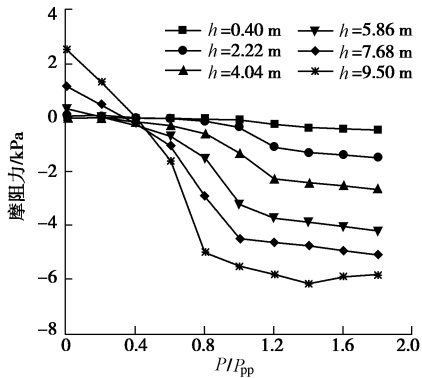


图 16 不同荷载水平下 I1 桶壁摩阻力竖向分布

Fig. 16 Distribution of vertical resistance on I1 under different values of P/P_{pp}

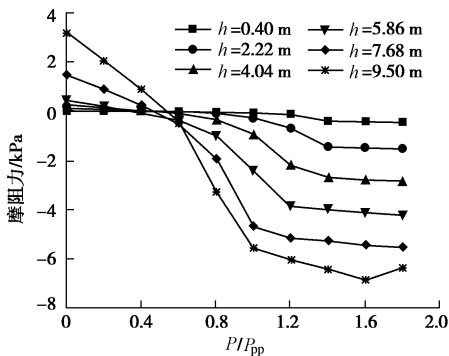


图 17 不同荷载水平下 I2 桶壁摩阻力竖向分布

Fig. 17 Distribution of vertical resistance on I2 under different values of P/P_{pp}

在侧面直壁段的 I3 处, 低荷载水平下, $P/P_{pp}<1.0$, 桶壁摩阻力变化很小, 当 $P/P_{pp}>1.0$ 时, 桶壁摩阻力减小, 当 $P/P_{pp}>1.4$ 时, 桶壁摩阻力反向, 如图 18 所示。

随荷载水平增加, 陆侧桶内土体受挤压, 内侧桶壁土压力随荷载水平增加而增加。在桶壁上, 土体

受桶体约束难以发生变形,桶壁下部,桶体受压缩挤入,桶土相对位移较大,桶壁摩阻力较大而且增加较快,如图 19, 20 所示。

随荷载水平增加,陆侧桶内土体受挤压,内侧桶壁土压力随荷载水平增加而增加。在桶壁上部,土体受桶体约束难以发生变形,桶壁下部,桶体受压缩挤入,桶土相对位移较大,桶壁摩阻力较大而且增加较快,如图 19, 20 所示。

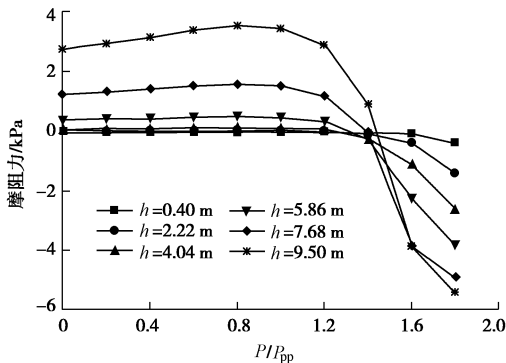


图 18 不同荷载水平下 I3 桶壁摩阻力竖向分布

Fig. 18 Distribution of vertical resistance on I3 under different values of P/P_{pp}

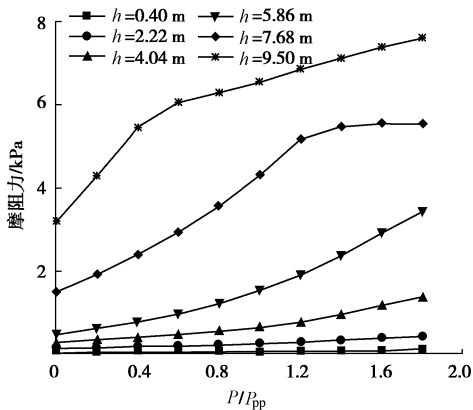


图 19 不同荷载水平下 I4 桶壁摩阻力竖向分布

Fig. 19 Distribution of vertical resistance on I4 under different values of P/P_{pp}

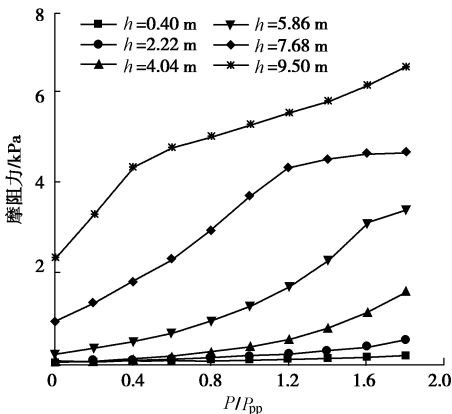


图 20 不同荷载水平下 I5 桶壁摩阻力竖向分布

Fig. 20 Distribution of vertical resistance on I5 under different values of P/P_{pp}

4.2 隔墙摩阻力分析

(1) 横向隔墙

不同荷载水平下,横向隔墙摩阻力如图 21, 22 所示。在靠近海侧隔墙 W1, 墙壁摩阻力随荷载水平减小至反向,然后继续增大,当荷载水平很高时, $P/P_{pp} > 1.4$, 桶内土体脱出桶体,桶内土体应力水平下降,墙壁摩阻力进而下降,如图 21 所示。

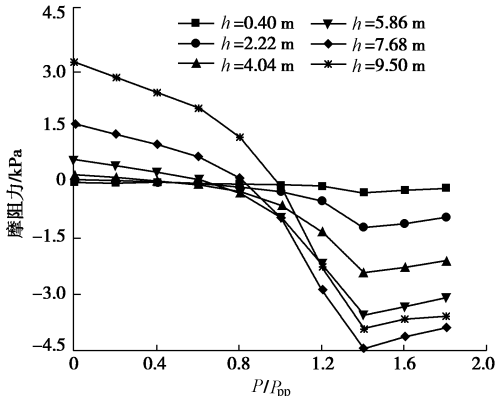


图 21 不同荷载水平下 W1 隔墙摩阻力竖向分布

Fig. 21 Distribution of vertical resistance on W1 under different values of P/P_{pp}

在靠近陆侧隔墙 W2, 如图 22 所示,桶体上部土体变形小,桶土相对位移很小,墙壁摩阻力难以发挥。在桶体中下部,荷载水平不是特别高的情况下,由于桶体转动中心在桶外,下部土体挤入桶体,隔墙墙壁摩阻力上升,当荷载水平很高时,桶体转动中心向桶体下部靠近陆侧方向移动,桶内下部土体脱出桶体,桶土之间产生相对位移,隔墙 W2 处墙体摩阻力减小。

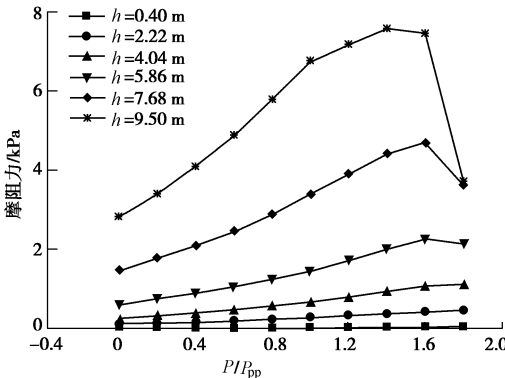


图 22 不同荷载水平下 W2 隔墙摩阻力竖向分布

Fig. 22 Distribution of vertical resistance on W2 under different values of P/P_{pp}

(2) 纵向隔墙

不同荷载水平下,纵向隔墙摩阻力如图 23~26 所示。对比图 16, 17, 19 及 20 可以看出,纵向隔墙摩阻力分布与内侧桶壁摩阻力分布极为接近。这是因为,在任一垂直于桶体长轴的剖面上,桶内土体与桶体之间的相对位移极很小,而且桶内土体与桶体内壁

及隔墙不会脱离。

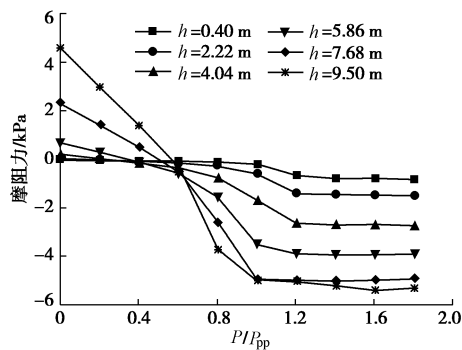


图 23 不同荷载水平下 W3 隔墙摩阻力竖向分布

Fig. 23 Distribution of vertical resistance on W3 under different values of P/P_{pp}

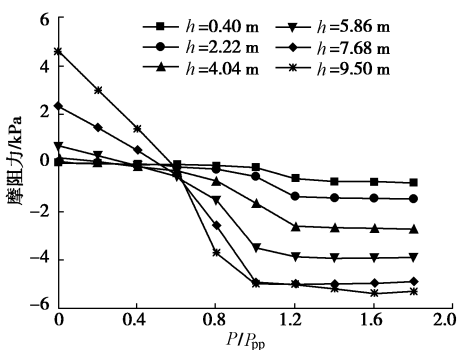


图 24 不同荷载水平下 W4 隔墙摩阻力竖向分布

Fig. 24 Distribution of vertical resistance on W4 under different values of P/P_{pp}

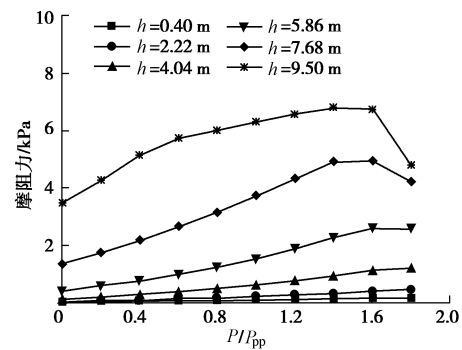


图 25 不同荷载水平下 W5 隔墙摩阻力竖向分布

Fig. 25 Distribution of vertical resistance on W5 under different values of P/P_{pp}

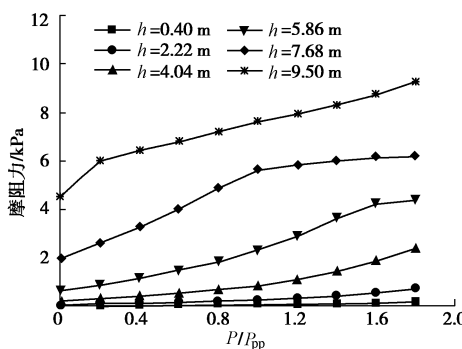


图 26 不同荷载水平下 W6 隔墙摩阻力竖向分布

Fig. 26 Distribution of vertical resistance on W6 under different values of P/P_{pp}

5 桶体端阻力分析

外侧桶壁底部端阻力如图 27 所示,海侧桶壁底部端阻力随荷载水平增加而降低,直至 $P/P_{pp} > 0.8$ 时,桶体侧壁与桶体脱离,端阻力降为零;陆侧桶壁端阻力随荷载水平增加而增加; $P/P_{pp} < 1.2$ 时,桶体侧面桶壁中部 B3 端阻力变化很小,当 $P/P_{pp} > 1.2$ 时,桶体转动中心移动至桶体下部靠陆侧, B3 处端阻力开始下降。

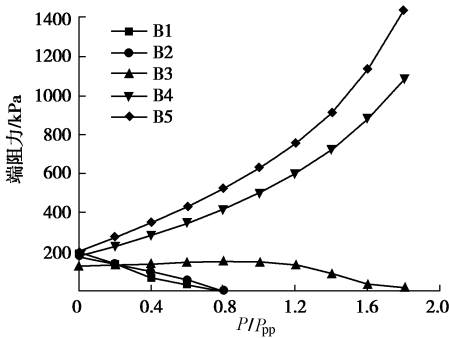


图 27 不同荷载水平下 B1~B5 桶底端阻力

Fig. 27 Resistance at end of bucket on B1~B5 under different values of P/P_{pp}

桶体内部隔墙端阻力如图 28 所示,靠近陆侧的 B10、B11 处端阻力随荷载水平增加而增加, B6~B9 处随荷载水平增加,当 $P/P_{pp} > 0.8$ 时,桶底与土体脱离,端阻力逐渐降为零。

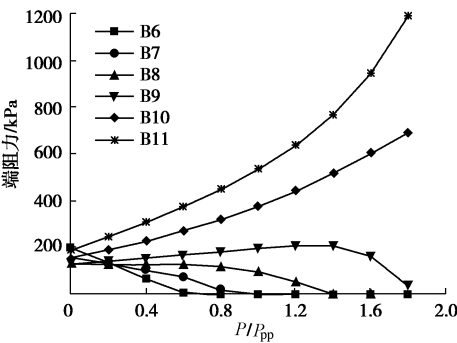


图 28 不同荷载水平下 B6~B11 端阻力

Fig. 28 Resistances at end of bucket on B6~B11 under different values of P/P_{pp}

6 结 论

(1)桶体阻力与桶土的接触状态及桶土相对位移有关。在转动中心左侧,即靠近海侧一边,随荷载水平增加,即 $P/P_{pp} > 0.4$ 时,外侧桶壁上部与土体脱离,桶壁摩阻力为零,下部产生相对于土体的向上位移,摩阻力由正转负;内侧桶壁及隔墙产生相对于土体的

向上位移, 墙壁摩阻力由正转负; 当 $P/P_{pp} > 0.8$ 时, 桶体底部与土体脱离, 端阻力为零。在转动中心右侧, 即靠近陆侧一边, 随荷载水平增加, 桶壁、隔墙及桶体底端阻力均增加。

(2) 波浪荷载作用下, 外侧桶壁摩阻力变化最大, 内侧桶壁与纵向隔墙摩阻力变化稍小而且分布类似, 横向隔墙摩阻力变化最小。当荷载水平不超过 $50a$ 一遇的波浪荷载时, 横向隔墙摩阻力基本上在 $0 \sim 3 \text{ kPa}$ 范围内变化。

(3) 对于淤泥质地基上的桶体, 桶壁、隔墙摩阻力整体不大, 大致在 $-10 \sim 10 \text{ kPa}$ 范围内变化; 由于桶底土体受到较大围压及土质情况的不同, 桶体端阻力在不同荷载水平下变化很大。

参考文献:

- [1] 王元战, 王海龙, 付瑞清. 沉入式大直径圆筒码头稳定性计算方法研究[J]. 岩土工程学报, 2002, **24**(4): 417 - 420. (WANG Yuan-zhan, WANG Hai-long, FU Rui-qing. Method of stability analysis of embedded large-diameter cylinder quay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, **24**(4): 417 - 420. (in Chinese))
- [2] WANG Y Z, ZHU Z Y. An approach to stability analysis of embedded large-diameter cylinder quay[J]. China Ocean Engineering, 2002, **16**(3): 383 - 393.
- [3] 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. (WANG Yuan-zhan, WANG Wen-liang. The computational method and engineering application of large-diameter cylindrical structure[M]. Beijing: China Communications Press, 2008. (in Chinese))
- [4] 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))
- [5] 吴梦喜. 软土地基中深埋式大圆筒结构的承载机制与稳定性分析方法[C]// 第九届土力学及岩土工程学术会议论文集. 北京: 清华大学出版社, 2003: 593 - 598. (WU Meng-xi. The bearing mechanism and stability analysis method of embedded large-diameter in soft ground[C]// Academic Collected Papers of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering of the Ninth Session. Beijing: Tsinghua University Press, 2003: 593 - 598. (in Chinese))
- [6] 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))
- [7] 徐光明, 章为民, 赖忠中. 沉入式大圆筒结构码头工作机理离心模型试验研究[J]. 海洋工程, 2001, **19**(1): 38 - 43. (XU Guang-ming, ZHANG Wei-min, LAI Zhong-zhong. Centrifuge modeling of quay walls composed of large-diameter cylinders embedded below mud line[J]. Ocean Engineering, 2001, **19**(1): 38 - 43. (in Chinese))
- [8] 王元战, 迟丽华. 考虑土体竖向剪切刚度的大直径圆筒结构变位计算方法[J]. 水运工程, 1996, **12**: 1 - 5. (WANG Yuan-zhan, CHI Li-hua. Method of displacement calculation of large-diameter cylinder considering soil vertical shear stiffness[J]. Port & Waterway Engineering, 1996, **12**: 1 - 5. (in Chinese))
- [9] 王元战, 迟丽华. 沉入式圆筒结构与土相互作用的模式及位移计算方法[J]. 土木工程学报, 1997, **30**(2): 68 - 73. (WANG Yuan-zhan, CHI Li-hua. Mode of interaction between embedded large-diameter cylinder and soil and method of displacement calculation[J]. China Civil Engineering Journal, 1997, **30**(2): 68 - 73. (in Chinese))
- [10] 迟丽华, 王玉红. 一种切力模型下大圆筒结构位移的迭代算法[J]. 天津大学学报, 1998, **31**(1): 85 - 89. (CHI Li-hua, WANG Yu-hong. An iterative approach to the displacements of large cylinder based on a vertical shear model [J]. Journal of Tianjin University, 1998, **31**(1): 85 - 89. (in Chinese))