

DOI: 10.11779/CJGE201501022

桥梁吸力式沉箱基础承载特性试验研究

张永涛¹, 杨炎华¹, 黎冰², 龚维明²

(1. 中交第二航务工程局有限公司技术中心, 湖北 武汉 430040; 2. 东南大学土木工程学院, 江苏 南京 210096)

摘 要: 吸力式沉箱基础是跨海桥梁基础的一个新选择。基于桥梁基础的受荷特点, 考虑不同的荷载作用方式, 通过一系列模型试验研究了砂土中吸力式沉箱基础的承载特性。试验结果表明: 沉箱的长度越长, 吸力式沉箱基础的竖向承载力越大, 侧壁摩阻力的贡献越大, 而沉箱端部阻力可忽略不计; 沉箱的长度越长, 吸力式沉箱基础的水平承载力也越高, 但相对于竖向承载力而言, 基础的水平承载力很小, 一般不超过其竖向承载力的 5%。预加一定的竖向荷载, 可显著提高吸力式沉箱基础的水平承载力, 且预加的竖向荷载越大, 基础的水平承载力越高, 由于桥梁工程中基础承受的竖向荷载很大, 所以有必要考虑这一因素对基础水平承载力的提高。

关键词: 吸力式沉箱基础; 桥梁; 承载力; 砂土; 模型试验

中图分类号: TU470

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2015)01-0177-06

作者简介: 张永涛(1978-), 男, 宁夏吴忠人, 硕士, 高级工程师, 主要从事深水基础理论与施工技术研究。E-mail: kiptom@vip.163.com。

Model tests on bearing performance of suction caisson foundation for bridges

ZHANG Yong-tao¹, YANG Yan-hua¹, LI Bing², GONG Wei-ming²

(1. Technology Center, CCCC Second Harbor Engineering Company Ltd., Wuhan 430040, China; 2. College of Civil Engineering,

Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: The suction caisson foundation is an alternative foundation for cross-sea bridges. Based on the loading characteristics of the foundation of cross-sea bridges, a series of model tests are carried out to investigate the bearing performance of the suction caisson foundation. Different loading directions are considered in the model tests. The test results show that the vertical bearing capacity of the suction caisson foundation and the contribution of sidewall friction resistance increase with the increasing length of suction, and the tip resistance of caisson can be neglected. The lateral bearing capacity of the suction caisson foundation also increases with the increasing length of suction, but it is small and no more than 5 percent of the vertical bearing capacity. The lateral bearing capacity of the suction caisson foundation can be improved significantly by pre-applied vertical loading, and the bigger the pre-applied vertical loading, the greater the lateral bearing capacity. The factor should be considered in dealing with the large vertical loading in bridge engineering.

Key words: suction caisson foundation; bridge; bearing capacity; sand; model test

0 引 言

随着经济的不断发展, 桥梁工程建设无论在规模和发展速度上都令世界瞩目, 目前已有多座跨海桥梁工程处于在建或筹建过程中。与普通的跨江(河、湖)桥梁基础相比, 跨海桥梁基础的设计和施工技术难度更大, 原因是跨海桥梁的桥址在外海, 水深大多超过 50 m, 风浪环境复杂, 采用搭建施工平台或采取合适的助沉手段都很困难。因此, 传统的群桩、沉井等深水基础已很难适应跨海桥梁的建设条件。在海洋平台技术中应用广泛的吸力式沉箱基础(suction caisson foundation, 也称为吸力式桶形基础)可作为跨海桥梁基础的一个新选择。

吸力式沉箱基础是一种底端敞开、上端封闭的大直径钢质圆桶结构, 利用负压进行沉贯施工, 具有施工简便、造价低等优点, 目前在深水海洋平台工程中应用广泛, 并已在海上风力发电工程中得到应用。到目前为止, 还未见吸力式沉箱基础应用于桥梁工程的报道, 但 2002 年日本的 Japan Bridge Engineering Center 就已对吸力式沉箱作为桥梁基础的适用性展开了研讨, 并着手根据以往超大型海洋结构物得到的实测结果, 编写和发行桥梁吸力式沉箱基础的设计和施

基金项目: 国家自然科学基金项目(50909020)

收稿日期: 2014-05-05

工工法。鉴于吸力式沉箱基础的优点,研究桥梁荷载作用下吸力式沉箱基础的承载性能具有重要的理论意义与工程应用价值。

桥梁基础的受力特点与深海海洋平台基础的受力特点有非常大的差异。深水海洋平台工程中的吸力式沉箱基础承受的主要是上拔荷载,所以目前绝大多数关于吸力式沉箱基础的研究成果是针对其抗拔承载性能的^[1-7];而桥梁工程中的基础承受的主要是包括下压荷载、水平荷载及力矩荷载在内的耦合荷载作用,目前还未见相关的研究成果,与其受力特点相近的是海上风机吸力式沉箱基础。Byrne 等^[8-9]开展了海上风机吸力式沉箱基础的静、动力模型试验,通过拟合试验屈服曲线提出了静力条件下单吸力式沉箱基础承载力的简化表达式。之后,Houlsby 等^[10-11]先后分别针对砂土地基和黏土地基中的吸力式沉箱基础开展了现场动力试验,重点研究了循环力矩荷载作用下吸力式沉箱基础的承载特性。Zhu 等^[12]通过模型试验研究了倾覆荷载作用下吸力式沉箱基础的变形模式,进而提出了极限承载力分析计算方法。朱斌等^[13]基于海上风机吸力式沉箱基础模型试验结果,提出了单吸力式沉箱基础和多吸力式沉箱基础的倾覆弯矩承载力分析方法。针对吸力式沉箱基础水平承载力低的特点,李大勇等^[14]在吸力式沉箱的基础上提出了裙式吸力基础,并通过在饱和细砂中的模型试验验证了这一设想。鲁晓兵等^[15]通过模型试验研究了饱和砂土中单沉箱和四沉箱基础的承载特性,对比分析了单沉箱和四沉箱基础承载力大小之间的关系。张建红等^[16]和鲁晓兵等^[17]通过离心模型试验研究了吸力式沉箱基础在水平静载和循环荷载作用下的动力响应。此外,Randolph 等^[18]、张金来等^[19]和武科等^[20]分别通过极限分析法和有限元法研究了吸力式沉箱基础在耦合荷载作用下的工作性状。海上风机基础的受力特点是倾覆荷载占主导作用,而海上桥梁基础主要承受竖向荷载作用,其次才是水平向荷载及力矩作用,所以两者有较大的差别。此外,目前关于竖向荷载和水平荷载共同作用下吸力式沉箱基础承载特性的研究很少,特别是试验研究。

鉴于上述现状,本文选择 3 种长径比的吸力式沉箱,通过模型试验研究桥梁吸力式沉箱基础的承载特性,为将吸力式沉箱基础应用于桥梁工程提供理论基础。

1 试验内容与试验方法

为了研究桥梁吸力式沉箱基础的承载特性,试验中考虑了 3 种不同长径比的沉箱模型(0.5, 1.0, 2.0),具体试验工况如表 1 所示。

表 1 试验工况汇总表

Table 1 Test programs		
荷载方向	荷载大小	沉箱尺寸
竖向荷载	—	$D=30\text{ cm}$ $L=15, 30, 60\text{ cm}$
水平荷载	—	$D=30\text{ cm}$ $L=15, 30, 60\text{ cm}$
组合荷载 (先施加竖向荷载,再施加水平荷载直至基础破坏)	5 个大小不同的 竖向荷载: 1, 5, 10, 20, 40 kN;	$D=30\text{ cm}, L=30\text{ cm}$
	3 个大小不同的 竖向荷载: 5, 10, 20 kN	$D=30\text{ cm}, L=15\text{ cm}$

本次试验在模型槽中进行,模型槽尺寸为 2 m×2 m×1.5 m(长×宽×高)。模型槽底部铺设 5cm 厚的碎石垫层作为进(排)水通道,在模型槽底部居中位置开孔并设置进(排)水阀门,然后与外界水源相连。模型试验所采用的地基土为砂土,粒径集中于 0.06~0.3 mm 之间, $G_s=2.68$, $\rho_{\text{dmin}}=1.25\text{ g/cm}^3$, $\rho_{\text{dmax}}=1.68\text{ g/cm}^3$,土的颗粒曲线如图 1 所示。地基土的总高度为 1.2 m,在地基填筑过程中,先在碎石垫层上铺设土工布,然后采用干砂进行分层填筑,每层厚度为 10 cm。填筑地基土时,控制土体干密度为 1.51 g/cm^3 ,相对密实度为 60%,具体操作是根据制样干密度和每层试验用砂的体积计算出该层砂的重量,然后将干砂称重后倒入模型槽内,压实至预定高度并抹平。填土完成后,打开进水阀,让水从下向上渗透,土体饱和完成后保持水面在泥面以上 2 cm。假设饱和后的土体与饱和前具有相同的密实度。

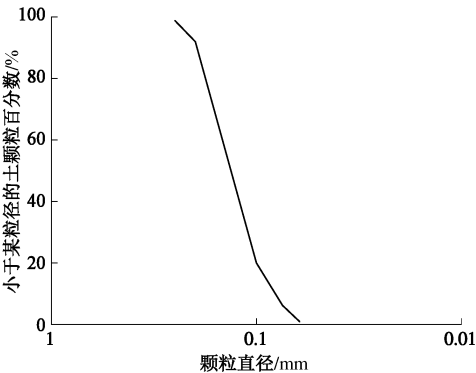


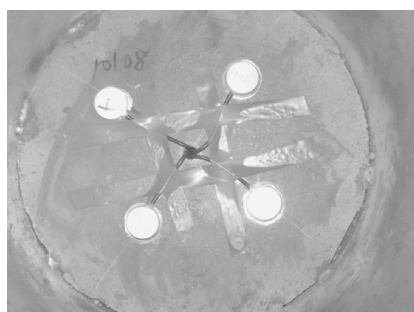
图 1 颗粒分析曲线

Fig. 1 Grain-size distribution curve

试验中所用沉箱模型为钢制,沉箱长 L 有 150, 300, 600 mm 三种,外径 D 皆为 300 mm,侧壁和顶板的厚度分别为 1 mm 和 10 mm;在沉箱顶板的下侧距中心约 75 mm 处对称开设 4 个圆形凹槽,凹槽直径 30 mm,深 5 mm 左右,凹槽内铺设厚约 2~3 mm 的硅胶垫层,然后放置土压力盒,以量测试验加载时沉箱顶板所受到的土压力,如图 2(a) 所示。竖向加载试验中,在沉箱中心线上自泥面向下 100 mm 处开始每隔 100 mm 埋设一个土压力盒,直至沉箱端部以下

300 mm 处;同时,自沉箱端部向下 100 mm 处开始每隔 100 mm 对称埋设两个土压力盒,直至沉箱端部以下 300 mm 处。在沉箱侧壁上等间距贴电阻式应变片,以量测试验加载过程中沉箱的应变。在沉箱顶板中心处设有抽气(水)孔,以接水气转换桶及真空泵。为方便试验加载,在沉箱顶板上侧焊接 4 个对称的加劲肋,加劲肋高为 50 mm。

地基土饱和 24 h 后,将沉箱模型贯入地基土中,尽量使得沉箱顶面与泥面持平,然后在沉箱顶面安装位移传感器。沉箱贯入地基 24 h 后再分级加载,每级荷载为沉箱模型预估承载力的 1/10。竖向荷载采用千斤顶加载,水平向荷载通过重物、加载架和滑轮对沉箱模型施加。吸力式沉箱基础的竖向加载试验中,至少加载至沉箱的竖向位移超过其直径的 1.5 倍;水平加载和组合加载试验中,加载至沉箱不能保持稳定为止。每次试验过程中,测量记录每级荷载下沉箱模型的位移、土压力、沉箱侧壁的应变。安装完成的模型试验如图 2 (b) 所示。



(a) 沉箱顶板内侧布设土压力盒



(b) 吸力式沉箱基础的竖向加载试验
图 2 试验照片

Fig. 2 Photo of experimental setup

2 试验结果与分析

2.1 吸力式沉箱基础的竖向抗压承载特性

试验过程中,随着竖向荷载的逐级施加,沉箱逐渐下沉,沉箱周围的砂土也随之发生沉陷,如图 3 所示。各吸力式沉箱基础的竖向荷载-位移曲线如图 4 所示,从图 4 中可以看出,随着竖向荷载的增大,基础的竖向位移随之增大,但荷载-位移曲线都近乎于直线,无明显的转折点,可以判断竖向荷载作用下吸力

式沉箱基础的破坏属于缓变型破坏。另外,在相同的竖向荷载作用下,沉箱的长度越长,产生的竖向位移越小,即承载力越大。



图 3 竖向荷载下吸力式沉箱基础破坏图

Fig. 3 Photo of failure of suction caisson foundation under vertical loading

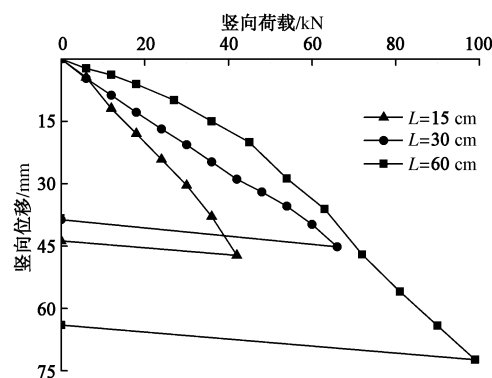


图 4 吸力式沉箱基础竖向荷载-位移曲线

Fig. 4 Vertical load-displacement curves of suction caisson foundation

竖向荷载作用下,吸力式沉箱基础的承载力来源于 4 部分,分别为沉箱顶板提供的阻力、内壁侧摩阻力、外壁侧摩阻力及端阻力。虽然沉箱的内外壁都贴了应变片,但由于外荷载作用下沉箱侧壁发生的是整体变形,所以无法区分内壁侧摩阻力和外壁侧摩阻力。因此,将内、外壁的侧摩阻力综合起来考虑。根据布置在沉箱顶板内侧的土压力盒、沉箱侧壁上的应变片及沉箱端部附近的土压力盒可分别换算得到沉箱顶板阻力、侧壁的摩阻力以及端阻力的近似值,具体方法是将顶板处测得的 4 个土压力值平均,然后乘以顶板下侧的表面积得到沉箱顶板的阻力;根据沉箱侧壁上应变片测得的应变、沉箱钢材的模量、应变片在竖向上的间距以及沉箱侧壁入土的表面积可计算出沉箱侧壁上的摩阻力;将沉箱端部土压力盒测得的土压力与沉箱侧壁的横截面面积相乘可近似得到沉箱端部的阻力。需要说明的是,侧壁和顶板各处的阻力有一定的差别,由于传感器布置的局限性,计算侧阻力和顶板阻力时,采用了均匀化的计算方法,所以结果是有误差的。

图 5 描述的是沉箱各部分所承担的荷载比例随竖向荷载的变化关系,从图 5 中可以看出,在沉箱直径相同的前提下,沉箱的长度越小,沉箱顶板承担的荷

载比例越大,侧壁摩阻力占竖向总荷载的比例越小,如沉箱长为 150 mm 时,顶板承担的荷载占总荷载的 80%左右,侧壁摩阻力约占总荷载的 20%;当沉箱长为 600 mm 时,顶板承担的荷载仅占总荷载的 27%左右,而此时侧摩阻力占总荷载的近 72%。由于沉箱的侧壁厚仅为 1 mm,所以吸力式沉箱基础的端阻力很小,在总荷载中所占比例不超过 3%,可忽略不计。

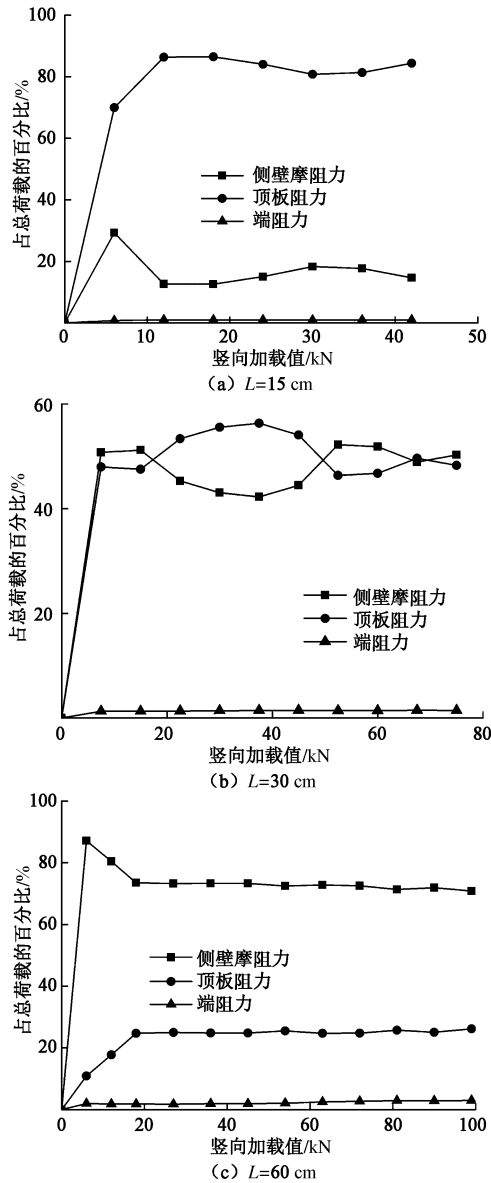


图 5 竖向荷载下沉箱各部分的荷载分担比

Fig. 5 Load sharing ratio of caisson under vertical loading

2.2 吸力式沉箱基础的水平承载特性

桥梁基础在使用过程中,除了承受竖向荷载作用之外,还受到上部结构传下来的由风、浪、流等引起的水平向荷载。图 6 为水平荷载作用下吸力式沉箱基础的荷载-位移曲线。从图 6 中可以清楚的看到,随着水平荷载的逐级增大,3 种长径比的吸力式沉箱基础的荷载-位移曲线都有明显的转折点,转折点之后,在相同的荷载增量下,沉箱的水平位移急剧增大,进而发生失稳。试验中,随着沉箱水平位移的增大,沉箱

发生明显倾斜,且荷载施加一侧的土体因沉箱侧壁的挤压而发生隆起,如图 7 所示。

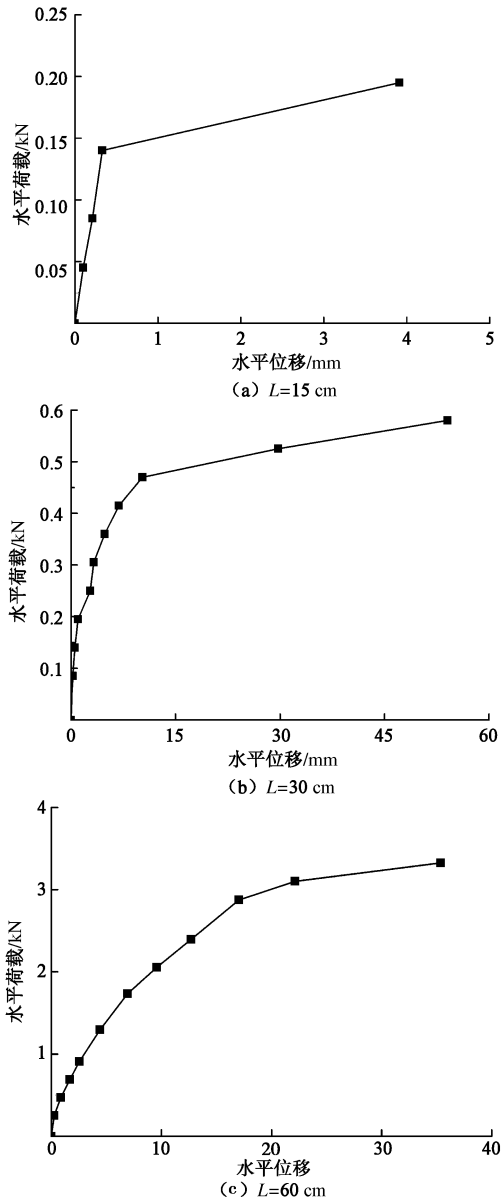


图 6 吸力式沉箱基础水平荷载-位移曲线

Fig. 6 Lateral load-displacement curves of suction caisson foundation



图 7 水平荷载下吸力式沉箱基础破坏图

Fig. 7 Photo of failure of suction caisson foundation under lateral loading

若以荷载-位移曲线上转折点对应的前一级荷载作为吸力式沉箱基础的水平极限承载力,则根据图 6

可得 3 种长径比基础各自的水平极限承载力, 如表 2 所示。从表 2 中可以看出, 在沉箱直径相同的条件下, 沉箱的长度对吸力式沉箱基础的水平极限承载力影响很大, 600 mm 长的吸力式沉箱基础的水平极限承载力分别大约为 300 mm 长和 150 mm 长的吸力式沉箱基础的 6 倍和 20 倍, 所以增大沉箱的长度是提高吸力式沉箱基础水平承载力的有效方法。此外, 3 种长径比基础破坏时的水平位移相差也很大, 基本规律是沉箱的长度越长, 破坏时的水平位移越大, 如 600 mm 长的吸力式沉箱基础破坏时的水平位移为 17.04 mm, 而 150 mm 长的吸力式沉箱基础破坏时的水平位移为 0.33 mm, 这说明了长度越长的吸力式沉箱基础其破坏前所允许发生的水平位移越大。

与竖向承载力相比, 吸力式沉箱基础的水平承载力要小很多, 且沉箱长度越小, 水平承载力与竖向承载力相差越大。

表 2 水平荷载下吸力式沉箱基础的极限承载力及破坏位移
Table 2 Bearing capacities and failure displacements of suction caisson foundation under lateral loading

沉箱长度/mm	破坏荷载/kN	水平位移/mm
600	2.88	17.04
300	0.47	10.24
150	0.14	0.33

2.3 组合荷载下吸力式沉箱基础的承载特性

桥梁工程中, 基础会受到竖向荷载和水平荷载的共同作用, 所以针对长径比为 1.0 和 0.5 的吸力式沉箱基础开展了组合荷载作用下的加载试验。考虑到基础所受水平荷载主要是由桥梁上部结构及桥墩受到风、浪、流等作用进而传递到基础上, 所以在试验中先施加大小不等的竖向荷载, 然后再施加水平荷载直至基础破坏。试验中所施加的竖向荷载的大小见表 1。

图 8 为组合荷载作用下吸力式沉箱基础的荷载-位移曲线。从荷载-位移曲线的型式上看, 各组合荷载下的曲线型式类似, 说明是否施加竖向荷载及竖向荷载的大小对荷载-位移曲线的整体变化规律没有影响; 此外, 不论施加竖向荷载与否, 吸力式沉箱基础的荷载位移曲线都有明显的转折点, 即当施加的水平荷载达到一定值后, 沉箱的位移急剧增大, 进而失稳。

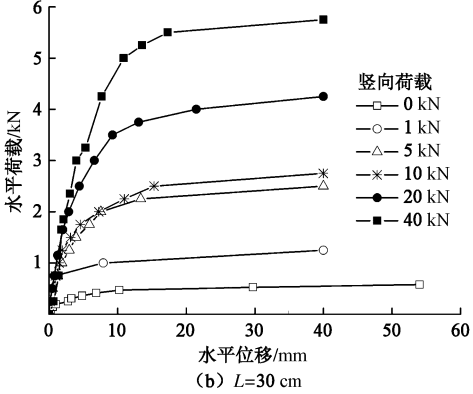
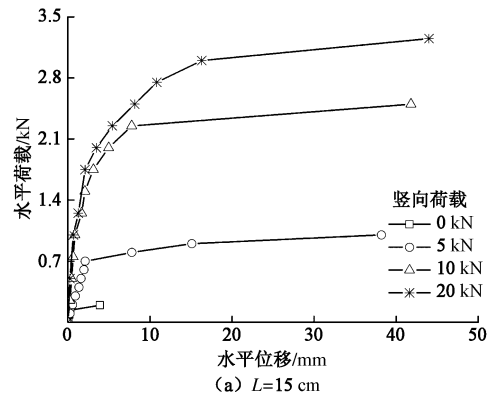


图 8 组合荷载下吸力式沉箱基础的荷载-位移曲线

Fig. 8 Combined load-displacement curves of suction caisson foundation

从图 8 中还可以看出, 随着竖向荷载的增大, 吸力式沉箱基础抵抗水平荷载的能力随之提高。以荷载-位移曲线上转折点对应的前一级荷载作为吸力式沉箱基础的水平极限承载力, 进而获得各组合荷载条件下基础的水平极限承载力, 画出基础水平极限承载力与预加的竖向荷载之间的关系曲线如图 9 所示。图 9 显示, 随着竖向荷载的增大, 吸力式沉箱基础的水平承载力显著提高, 两者之间的关系曲线类似于双曲线。

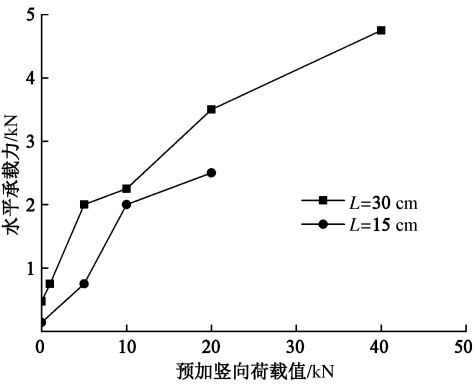


图 9 吸力式沉箱基础的水平承载力与预加竖向荷载关系曲线

Fig. 9 Relationship between lateral bearing capacity of suction caisson foundation and pre-applied vertical loading

3 结论与建议

(1) 竖向荷载作用下, 吸力式沉箱基础呈缓变型破坏特征, 其极限承载力由工程所允许的沉降量控制。沉箱的长度越长, 吸力式沉箱基础的承载力越高, 且侧壁摩阻力占总荷载的比例越大, 而沉箱端部的阻力可忽略不计。

(2) 在沉箱直径相同的条件下, 增大沉箱的长度是提高吸力式沉箱基础水平承载力有效方法, 但与竖向抗压承载力相比, 吸力式沉箱基础的水平承载力要小很多。

(3) 当先施加一定的竖向荷载, 再施加水平荷载时, 可显著提高吸力式沉箱基础的水平承载力。因此,

在桥梁工程中应考虑基础承受竖向荷载大而对水平承载力有显著提高这一重要特性。

参考文献:

- [1] RAO S N, LATHA K H, PALLAVI B, et al. Studies on pullout capacity of anchors in marine clays for mooring systems[J]. *Applied Ocean Research*, 2006, **28**(2): 103 - 111.
- [2] GAO Yu-feng, QIU Yue, LI Bing, et al. Experimental studies on the anti-uplift behavior of the suction caissons in sand[J]. *Applied Ocean Research*, 2013, **43**: 37 - 45.
- [3] BANG S, JONES K D, KIM K O, et al. Inclined loading capacity of suction piles in sand[J]. *Ocean Engineering*, 2011, **38**(7): 915 - 924.
- [4] JONES K D, BANG S, CHO Y. Pullout capacity of embedded suction anchors in sand[J]. *Ocean Engineering*, 2007, **34**(16): 2107 - 2114.
- [5] MONAJEMI H, RAZAK H A. Finite element modeling of suction anchors under combined loading[J]. *Marine Structures*, 2009, **22**(4): 660 - 669.
- [6] KUMAR N D, RAO S N. Earth pressures on caissons in marine clay under lateral loads - a laboratory study[J]. *Applied Ocean Research*, 2010, **32**(1): 58 - 70.
- [7] 黎冰, 郑翔, 高玉峰, 等. 砂土中吸力式沉箱基础抗拔承载特性试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2013, **35**(5): 902 - 907. (LI Bing, ZHENG Xiang, GAO Yu-feng, et al. Model tests on pull-out capacity of suction caisson foundation in sand [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, **35**(5): 902 - 907. (in Chinese))
- [8] BYRNE B W, HOULSBY G T. Foundations for offshore wind turbines[J]. *The Philosophical Transactions of the Royal Society*, 2003, **361**(1813): 2909 - 2930.
- [9] BYRNE B W, HOULSBY G T. Experimental investigations of the response of suction caissons to transient vertical loading[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 2002, **128**(11): 926 - 939.
- [10] HOULSBY G T, KELLY R B, HUXTABLE J, et al. Field trials of suction caissons in clay for offshore wind turbine foundations[J]. *Géotechnique*, 2005, **55**(4): 287 - 296.
- [11] HOULSBY G T, KELLY R B, HUXTABLE J, et al. Field trials of suction caissons in sand for offshore wind turbine foundations[J]. *Géotechnique*, 2006, **56**(1): 3 - 10.
- [12] ZHU B, KONG D Q, CHEN R P, et al. Installation and lateral loading tests of suction caissons in silt[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2011, **48**(7): 1070 - 1084.
- [13] 朱斌, 应盼盼, 郭俊科, 等. 海上风电机组吸力式桶形基础承载力分析与设计[J]. *岩土工程学报*, 2013, **35**(增刊 1): 443 - 450. (ZHU Bin, YING Pan-pan, GUO Jun-ke, et al. Analysis and design of bearing capacity of suction caisson foundations of offshore wind turbines[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, **35**(S1): 443 - 450. (in Chinese))
- [14] 李大勇, 冯凌云, 张宇坤, 等. 饱和细砂中进行裙式吸力式基础水平单调加载模型试验——承载力及变形分析[J]. *岩土工程学报*, 2013, **35**(11): 2030 - 2037. (LI Da-yong, FENG Ling-yun, ZHANG Yu-kun, et al. Model tests of skirted suction caissons in saturated fine sand under horizontal monotonic loading: lateral bearing capacity and deformations[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, **35**(11): 2030 - 2037. (in Chinese))
- [15] 鲁晓兵, 矫滨田, 刘亮. 饱和砂土中桶形基础承载力的实验研究[J]. *岩土工程技术*, 2006, **26**(4): 170 - 172. (LU Xiao-bing, JIAO Bin-tian, LIU Liang. Experimental study on the bearing capacity of bucket foundation in saturated sand[J]. *Geotechnical Engineering Technique*, 2006, **26**(4): 170 - 172. (in Chinese))
- [16] 张建红, 林小静, 鲁晓兵. 水平荷载作用下张力腿平台吸力式基础的物理模拟[J]. *岩土工程学报*, 2007, **29**(1): 77 - 81. (ZHANG Jian-hong, LIN Xiao-jing, LU Xiao-bing. Physical modeling of suction foundations of TLPs under horizontal loads[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2007, **29**(1): 77 - 81. (in Chinese))
- [17] 鲁晓兵, 王义华, 张建红, 等. 水平动载下桶形基础变形的离心机实验研究[J]. *岩土工程学报*, 2005, **27**(7): 789 - 791. (LU Xiao-bing, WANG Yi-hua, ZHANG Jian-hong, et al. Centrifuge test on the deformation of bucket foundation under horizontal vibration load[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2005, **27**(7): 789 - 791. (in Chinese))
- [18] RANDOLPH M F, HOUSE A R. Analysis of suction caisson capacity in clay[C]// *Proceedings of 34th Offshore Technology Conference*. Houston, 2002: 151 - 162.
- [19] 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))
- [20] 武科, 栾茂田, 范庆来, 等. 滩海桶形基础破坏机制及极限承载力分析研究[J]. *岩土工程学报*, 2008, **30**(3): 394 - 398. (WU Ke, LUAN Mao-tian, FAN Qing-lai, et al. Failure mechanism and ultimate bearing capacity of bucket foundation in shallow water[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2008, **30**(3): 394 - 398. (in Chinese))