DOI:10.16198/j.cnki.1009-640X.2018.01.011
杨剑, 黎冰, 杜杰. 吸力式沉箱组合基础承载特性研究[J]. 水利水运工程学报, 2018(1): 73-79. (YANG Jian, LI Bing, DU Jie. Study of bearing characteristics of combined suction caisson foundation[J]. Hydro-Science and Engineering, 2018(1): 73-79. (in Chinese))

吸力式沉箱组合基础承载特性研究

杨　剑[1], 黎　冰[2], 杜　杰[2]
(1. 中交公路规划设计院有限公司上海分公司, 上海　200072; 2. 东南大学 土木工程学院, 江苏 南京　210096)

摘要: 基于吸力式沉箱基础应用于桥梁工程的背景,考虑不同数量的沉箱组合和沉箱间距,通过数值模拟的方法研究了吸力式沉箱组合基础的承载特性,重点分析了组合基础与单个基础承载性状的差异,以及连接各沉箱的顶板对基础承载力的贡献。计算结果表明,沉箱组合基础与单个沉箱基础的荷载-位移曲线类型都相同;受类似于"群桩"效应的影响,竖向荷载作用下组合基础中的沉箱承载力不能完全发挥,但由于沉箱之间的连接顶板可以提供阻力,所以当沉箱间距较大时组合基础的承载力会大于相应数量单个基础的承载力之和,且随着沉箱间距的增大而增大;对于水平荷载作用下的吸力式沉箱组合基础,其承载力大于相应数量单个基础的承载力之和,连接顶板底部与土体之间的摩擦和挤压对于组合基础承载力的提高可以忽略不计。

关　键　词: 吸力式沉箱基础; 桥梁工程; 承载特性; 有限元分析
中图分类号: TU470　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1009-640X(2018)01-0073-07

随着我国经济的快速发展,对交通的便利性要求越来越高,目前有多座跨海桥梁工程处于在建或筹建过程中。跨海桥梁的桥址处水较深,环境复杂,传统的桩、沉井等基础型式已很难满足要求,吸力式沉箱基础正成为跨海桥梁基础的一个新选择[1]。吸力式沉箱基础是一种上端封闭、底面敞开的空心圆柱体结构,施工时利用负压进行沉贯,具有施工简便、造价低等优点,目前已在深水海洋平台工程中广泛应用,也应用于海上风电工程。

目前已有关于吸力式沉箱基础的研究主要针对其抗拔承载性能[2-7],这是因为深水海洋平台中基础承受的主要是上拔荷载,而桥梁基础承受的主要是下压荷载、水平荷载及力矩荷载在内的耦合荷载,目前这方面的研究很少。张永涛等[1]通过模型试验研究了砂土中单个吸力式沉箱基础的承载特性。金书成等[8]基于将吸力式沉箱基础应用于桥梁工程的背景,通过模型试验研究了单沉箱基础与四沉箱组合基础的承载特性,并分析了其破坏模式。

与桥梁基础受力特点相近的是海上风机基础。Zhu 等[9-10]通过模型试验研究了倾覆荷载作用下吸力式沉箱基础的特性,并提出了承载力计算方法。李大勇等[11]在吸力式沉箱的基础上提出了裙式吸力基础以提高其水平承载力,然后通过模型试验验证了这一设想。Byrne 等[12-13]基于静、动力模型试验结果,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。Houlsby 等[14-15]针对吸力式沉箱基础开展了现场动力试验,研究了循环力矩荷载作用下吸力式沉箱基础的承载特性。需要说明的是,海上桥梁基础主要承受竖向荷载作用,而海上风机基础的受力特点是倾覆荷载占主导作用,两者有较大差别。

由于桥梁基础所承受的外荷载很大,若用 1 个沉箱作为基础,则需将沉箱尺寸设计得非常大,这会给制造、运输和施工带来很大麻烦,所以考虑将多个沉箱组合在一起,即多沉箱组合基础。因此,研究桥梁荷载作用下吸力式沉箱组合基础的承载性能具有重要的理论意义与工程应用价值。目前关于这方面的研究仅有文

收稿日期: 2017-08-03
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51578145)
作者简介: 杨　剑(1975—), 男, 陕西安康人, 高级工程师, 博士, 主要从事岩土工程及地下工程等领域的设计及科研工作。E-mail: hhyj175@163.com

献[8],且是模型试验,考虑的因素相对较少。本文拟通过数值模拟的方法研究吸力式沉箱组合基础的承载性状,重点分析沉箱的组合型式、间距等因素的影响。

1 模型建立与工况设定

采用 ABAQUS 软件进行模拟。模型中假定地基土为黏土,土体密度 $\rho=1.9$ g/cm^3,弹性模量 $E=20$ MPa,泊松比 $\nu=0.4$,黏聚力 $c=30$ kPa,内摩擦角 $\varphi=15°$。吸力式沉箱基础为钢质,密度 $\rho=7.85$ g/cm^3,弹性模量 $E=210$ GPa,泊松比 $\nu=0.2$。土体采用 Mohr-Coulomb 屈服准则的理想弹塑性模型,沉箱采用线弹性本构模型。

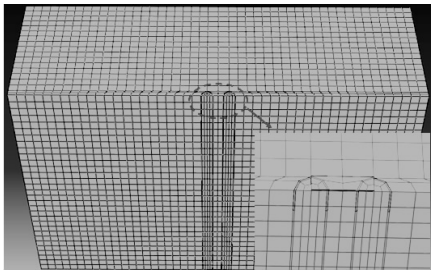

图 1 计算模型

Fig. 1 Calculation model

考虑沉箱与土体的接触作用,沉箱表面为主面,土体表面为从面,两者的法向接触采用“硬”接触形式,切向接触面之间的摩擦效应采用“罚”函数进行模拟,摩擦系数取 0.2。模型大小为 200 m×200 m×200 m;模型边界条件为:底面 $U_1=U_2=U_3=0$,侧面 $U_1=U_2=0$,U_1,U_2,U_3 分别为 x,y,z 方向的位移。单元采用 C3D8R。模型示意见图 1(以 2 个沉箱组合基础为例)。

为了研究吸力式沉箱组合基础的承载特性,从单吸力式沉箱基础着手,进而研究不同沉箱数量的组合基础,并考虑沉箱直径和间距的影响,具体工况如表 1 所示。

结合跨海桥梁水流方向和基础受力特点,吸力式沉箱组合基础的水平受荷方向设定如图 2 所示。

表 1 计算工况

Tab. 1 Test programs

工况	沉箱数量	直径/m	长径比	间距/m	壁厚/m
1	1	4,8	0.5,1.0,2.0	/	0.2
2	2	4	1.0	8,10,12	0.2
3	3	4	1.0	8,10,12	0.2
4	4	4	1.0	8,10,12	0.2

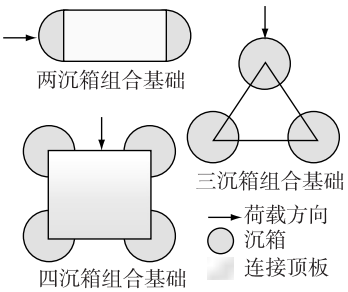

图 2 吸力式沉箱组合基础水平受荷方向

Fig. 2 Lateral loading direction of combined suction caisson foundation

2 单吸力式沉箱基础承载特性分析

图 3 为竖向荷载作用下单吸力式沉箱基础的荷载-位移曲线,可以看出,曲线呈缓变性,并无明显转折点。鉴于目前关于该基础型式并无明确的破坏标准,本文采用沉箱位移达到 5%沉箱直径时对应的荷载和沉箱荷载-位移曲线出现转折点时对应的荷载两者中的较小值作为其极限承载力(若有)。依据此标准,可得各尺寸吸力式沉箱基础的竖向极限承载力,如表 2 所示。

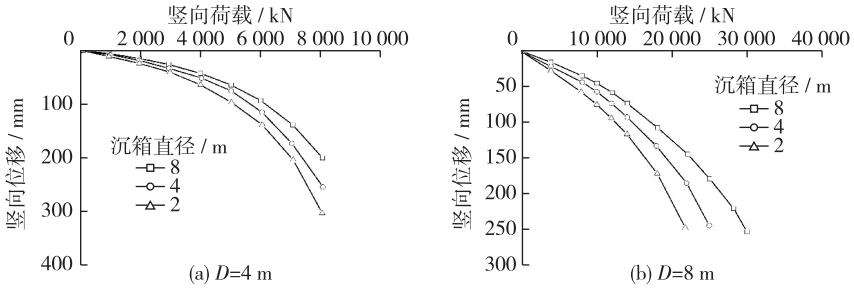

图 3 单吸力式沉箱基础的竖向荷载-位移曲线

Fig. 3 Vertical load-displacement curves of single suction caisson foundation

从表 2 可知，相同直径的条件下，沉箱的长径比越大，基础承载力越大，这是由于长度越大，沉箱侧壁提供的摩阻力越大，所以基础的竖向承载力也越大。而由于沉箱侧壁厚很小，当沉箱的长径比较大时沉箱端部提供的端阻力可以忽略不计。

对比表 2 中 2 种直径基础的承载力可以发现，基础直径增大后，承载力显著提高，例如直径 8 m、长径比为 0.5 的基础与直径 4 m、长径比为 1.0 的基础长度相同，区别在于直径不同，但前者的竖向承载力约为后者的 3 倍，这是由于沉箱的直径越大，其顶板面积也越大，能够提供更大的顶板阻力。

表 2　单吸力式沉箱基础竖向极限承载力

Tab. 2　The vertical ultimate bearing capacity of single suction caisson foundations　　kN

直径 /m	长径比		
	0.5	1.0	2.0
4	4 600	5 200	6 300
8	16 600	20 900	27 000

图 4 是水平荷载作用下单吸力式沉箱基础的荷载-位移曲线。从图中可以看出，随着沉箱直径的增大，基础的水平极限承载力逐渐增大，但与竖向荷载-位移曲线不同，水平荷载-位移曲线有明显的转折点，所以取荷载-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，进而可得各尺寸吸力式沉箱基础的水平极限承载力，如表 3 所示。

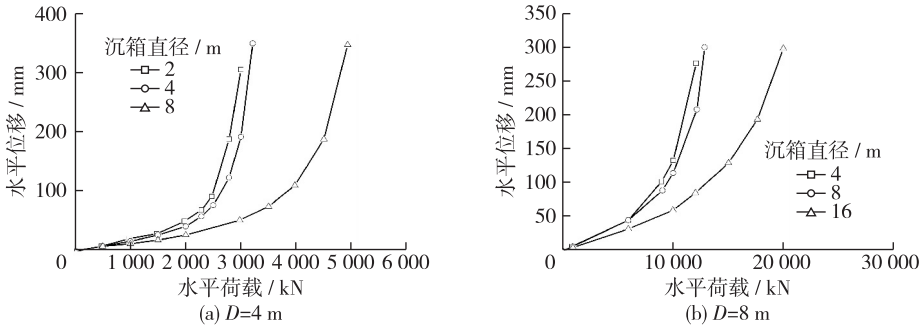

图 4　单吸力式沉箱基础的水平荷载-位移曲线

Fig. 4　Lateral load-displacement curves of single suction caisson foundation

从图 4 中可以看出，3 种长径比基础破坏时的水平位移相差较大，基本规律是沉箱长度越长，破坏时的水平位移越大。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。

从表 3 可以看出，与竖向加载时类似，直径 8 m 的基础水平极限承载力相比于直径 4 m 的基础显著增大，这是因为沉箱的直径越大，基础前侧承受被动土压力的范围越大，相应的承载力也会提高。

表 3　单吸力式沉箱基础水平极限承载力

Tab. 3　Lateral ultimate bearing capacity of single suction caisson foundation　　kN

直径 /m	长径比		
	0.5	1.0	2.0
4	2 300	2 550	3 750
8	7 800	8 500	16 000

3　吸力式沉箱组合基础承载特性分析

3.1　吸力式沉箱组合基础的竖向承载特性

图 5 分别是竖向荷载作用下 2，3 和 4 个沉箱组合基础的荷载-位移曲线。从图 5 中可以看出，与单吸力式沉箱基础相比，组合基础的竖向荷载-位移曲线陡一些，有明显的转折点。

表 4 为相应各工况下基础竖向极限承载力。可以发现，随着沉箱间距的增大，组合基础的竖向极限承载力明显增大。当沉箱间距为 8 m 时，组合基础的承载力小于相应数量单沉箱基础的承载力之和，这是因为沉箱与沉箱之间距离较小，类似于“群桩”效应明显，削弱了基础承载力的发挥；而当沉箱间距增大为 2.5 倍和 3 倍沉箱直径时，组合基础的承载力就超过了相应数量单沉箱基础的承载力之和，这是因为沉箱间距增大，“群桩”效应逐渐减弱；且由于连接各沉箱的顶板与泥面直接接触，在上部荷载作用下基础发生下沉，顶板也会提供阻力，从而提高基础的承载力，沉箱间距越大，连接各沉箱的顶板面积越大，提供的阻力越大。

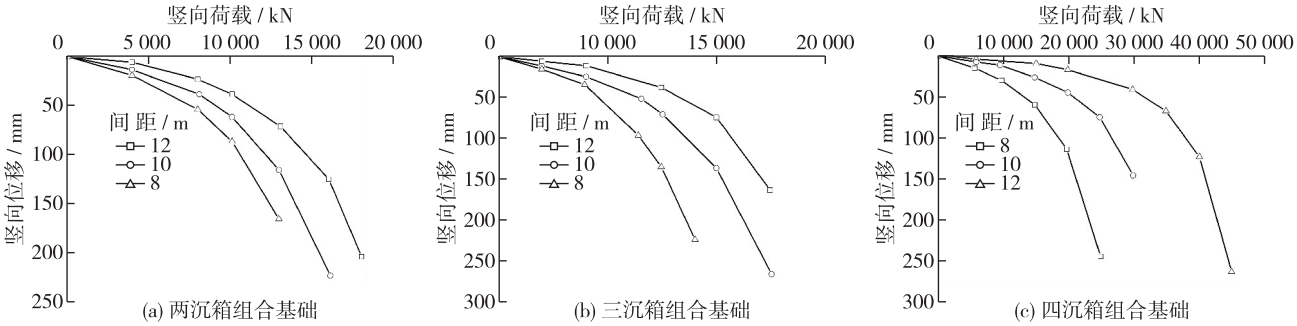

图 5 不同间距下沉箱组合基础竖向荷载-位移曲线

Fig. 5 Vertical load-displacement curves of combined caissons foundation under different spacings

表 4 吸力式组合基础竖向极限承载力

Tab. 4 Vertical ultimate bearing capacity of combined suction caisson foundation

沉箱数量	间距 /m	承载力/(10^3kN)	沉箱数量	间距 /m	承载力/(10^3kN)
2	8	9.5 (0.91)	3	12	21.0(1.35)
2	10	11.5(1.11)	4	8	16.5(0.79)
2	12	15.0(1.44)	4	10	25.0(1.20)
3	8	13.5(0.87)	4	12	36.0(1.73)
3	10	16.5(1.06)			

注:( )中数值为该承载力与相应数量单沉箱基础承载力之和之比。

3.2 吸力式沉箱组合基础的水平极限承载力

图 6 是水平荷载作用下 2,3 和 4 个沉箱组合基础的荷载-位移曲线,与单吸力式沉箱基础的水平荷载-位移曲线相似,都有明显的转折点。从图 6 可以发现,随着沉箱间距增大,组合基础的水平极限承载力逐渐增大,但增大幅度有限。

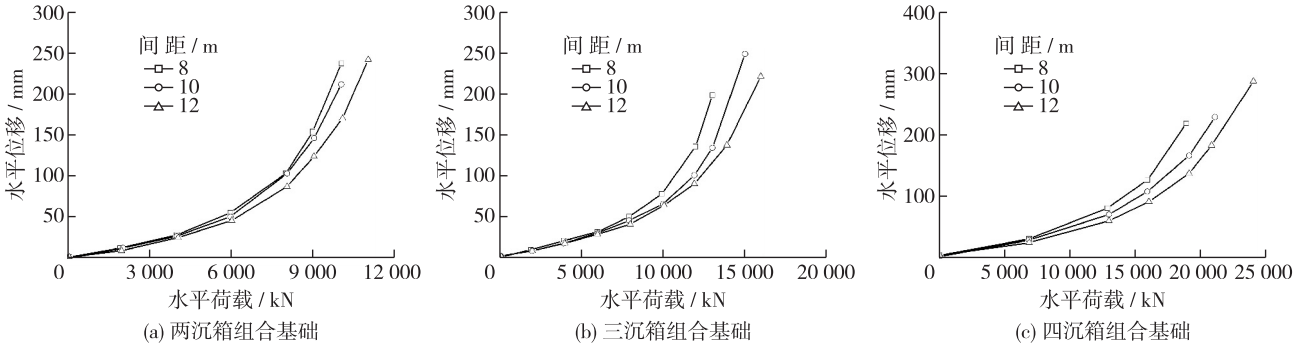

图 6 不同间距下沉箱组合基础竖向荷载-位移曲线

Fig. 6 Lateral load-displacement curves of combined caissons foundation under different spacings

表 5 为相应各工况下基础竖向极限承载力,可以看出,不论沉箱间距大小,组合基础的水平承载力都大于相应数量单沉箱基础承载力之和,这是由于沉箱间距的存在,平面上跨度增大,提高了基础的抗倾覆能力,这也是为什么沉箱间距增大,组合基础的水平承载力随之增大的原因之一;另外一个原因是由于沉箱之间的连接顶板与泥面接触,当基础在水平荷载作用下发生倾斜之后顶板的一端也会挤压泥面,从而提供稍许抗力。总体而言,沉箱间距的改变对组合基础的水平承载力影响较小。

表 5　吸力式组合基础水平极限承载力

Tab. 5　Lateral ultimate bearing capacity of combined suction caisson foundations

沉箱数量	间距 /m	承载力/(10^3kN)	沉箱数量	间距 /m	承载力/(10^3kN)
2	8	7.0(1.37)	3	12	13.0(1.70)
2	10	7.1(1.39)	4	8	14.0(1.37)
2	12	7.9(1.55)	4	10	15.5(1.52)
3	8	9.5(1.24)	4	12	17.5(1.72)
3	10	12.0(1.57)			

注：( ) 中数值为该承载力与相应数量单沉箱基础承载力之和之比。

3.3　连接顶板对组合基础承载力的影响

由上述分析可知，沉箱之间的连接顶板对于组合基础的承载力有贡献，为了掌握连接顶板在组合基础承载力中所贡献的比例，选取各沉箱中心间距均为 10 m 的 2，3，4 个吸力式沉箱组合基础，建立模型时，将连接顶板设置为高出泥面 20 cm(0.05D)，从而依据之前确定的破坏标准，保证得到的承载力不包含顶板的贡献。

连接顶板与泥面有、无接触情况下，竖向荷载作用下吸力式沉箱组合基础的荷载-位移对比曲线如图 7 所示。从图中可以发现，连接顶板与泥面有无接触对基础的荷载-位移曲线并无影响，但在连接顶板与泥面无接触的情况下，基础承载力要小很多。

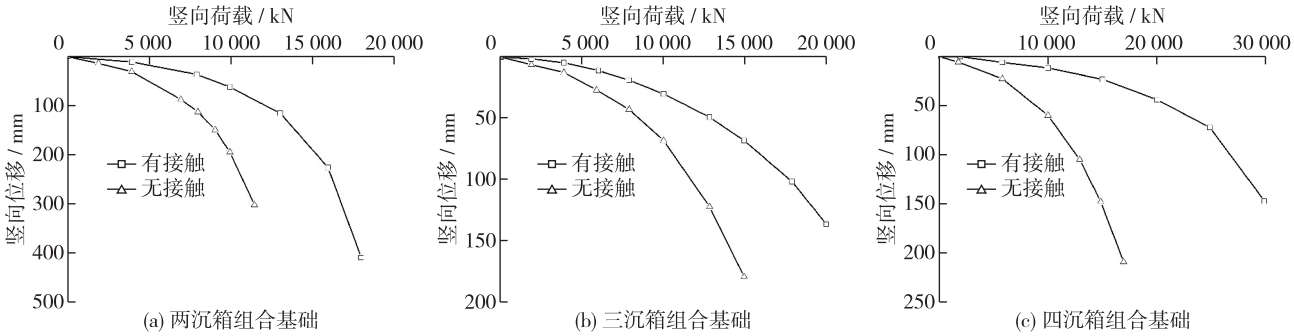

图 7　有无接触条件下沉箱组合基础竖向荷载-位移曲线

Fig. 7　Vertical load-displacement curves of combined caissons foundation with or without connection roof

表 6 为各工况下组合基础的竖向极限承载力。从表 6 中可见，当连接顶板与泥面无接触时，即剔除顶板在组合基础竖向极限承载力中的贡献后，2，3 和 4 个吸力式沉箱组合基础的竖向极限承载力分别是连接顶板与泥面有接触时的 76.5%，66.7% 和 50.0%，也均小于相应数量同规格单吸力式沉箱基础的竖向极限承载力之和。这说明顶板的作用显著，且随着沉箱数量的增多，作用逐渐增大，这是因为连接顶板面积越大，顶板能够提供的阻力越大。

表 6　顶板有无接触条件下组合基础的竖向极限承载力

Tab. 6　Vertical ultimate bearing capacity of combined suction caisson foundation with or without connection roof

沉箱数量	2		3		4	
顶板有无接触	有	无	有	无	有	无
承载力/kN	11 500	8 800	16 500	11 000	25 000	12 500

图 8 为连接顶板与泥面有、无接触情况下，水平荷载作用下吸力式沉箱组合基础的荷载-位移对比曲线。从图中可以看出，连接顶板与有、无条件下基础的荷载-位移曲线类型相似，只是抵抗水平荷载的能力有差异，基本规律是连接顶板与泥面有接触时，基础的承载力更高，但差异很小，原因在于连接顶板提供的阻力来源于顶板一端挤压土体，但由于基础整体变形不大，所以受顶板挤压的土体区域较小。因此，连接顶板底部与土体之间的摩擦和挤压对于组合基础水平承载力的贡献不大，沉箱挤压前侧土体产生的被动土压力才是基础水平承载力最主要来源，此外沉箱间距的增大，也会促进抗滑力及抗倾力矩的提高。

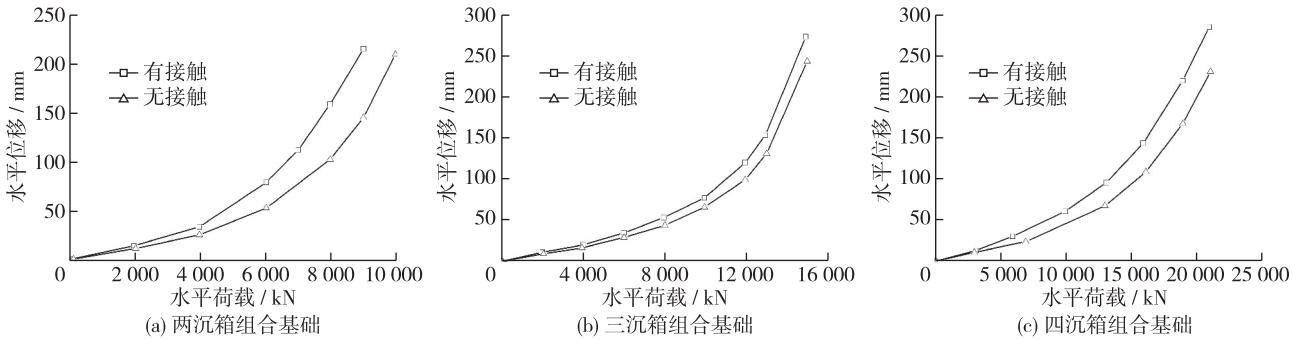

图 8 有无接触条件下沉箱组合基础水平荷载-位移曲线

Fig. 8 Lateral load-displacement curves of combined caissons foundation with or without connection roof

4 结 语

(1)竖向荷载作用下,吸力式沉箱基础的承载力来源于沉箱侧壁的摩擦力和顶板的阻力,其荷载-位移曲线呈缓变型;水平荷载作用下,吸力式沉箱基础的承载力来源于沉箱前侧土体提供的土抗力,其荷载-位移曲线有明显拐点。

(2)对于竖向荷载作用下的吸力式沉箱组合基础,当沉箱间距较小时,受类似于桩基础的“群桩”效应的影响,其承载力小于相应数量单个基础的承载力之和;随沉箱间距增大,组合基础的竖向承载力将超过相应数量单个基础的承载力之和,并随间距的增加而增大。沉箱之间的连接顶板上的阻力是组合基础承载力的重要来源之一,可在一定范围内通过增大沉箱间距的方式提高组合基础承载力。

(3)对于水平荷载作用下的吸力式沉箱组合基础,其承载力大于相应数量单个基础的承载力之和,且会随着沉箱间距的增大而增大,但增幅很小。沉箱之间的连接顶板底部与土体之间的摩擦和挤压对于组合基础承载力的提高可以忽略不计。

参 考 文 献:

[1] 张永涛, 杨炎华, 黎冰, 等. 桥梁吸力式沉箱基础承载特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(1): 177-182. (ZHANG Yongtao, YANG Yanhua, LI Bing, et al. Model tests on bearing performance of suction caisson foundation for bridges [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(1): 177-182. (in Chinese))

[2] 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.

[3] GAO Yufeng, 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.

[4] 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.

[5] JONESA K D, BANG S, CHO Y. Pullout capacity of embedded suction anchors in sand[J]. Ocean Engineering, 2007, 34(16): 2107-2114.

[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 Yufeng, 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] 金书成, 仇正中, 张永涛, 等. 桥梁吸力式沉箱组合基础静载试验研究[J]. 桥梁建设, 2015, 45(1): 62-67. (JIN Shucheng, QIU Zhenzhong, ZHANG Yongtao, et al. Static load test study of suction caisson combined foundation for bridge[J].

Bridge Construction, 2015, 45(1): 62-67. (in Chinese))

[9] 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.

[10] 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 Panpan, GUO Junke, et al. Analysis and design of bearing capacity of suction caisson foundations of offshore wind turbines[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(Suppl1): 443-450. (in Chinese))

[11] 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 Dayong, FENG Lingyun, ZHANG Yukun, 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))

[12] BYRNE B W, HOULSBY G T. Foundations for offshore wind turbines[J]. The Philosophical Transactions of the Royal Society, 2003, 361(1813): 2909-2930.

[13] 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.

[14] 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.

[15] 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.

Study of bearing characteristics of combined suction caisson foundation

YANG Jian[1], LI Bing[2], DU Jie[2]

(1. *Shanghai Branch, CCC Highway Consultants Co., Ltd., Shanghai* 200072, *China*; 2. *College of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing* 210096, *China*)

Abstract: Based on the application background of the suction caisson foundation in bridge engineering, a numerical simulation method is used to investigate the bearing performance of the combined suction caisson foundation, and the number and spacings of caissons are considered. The effort is focused on the difference of bearing performance between the combined foundation and the single foundation, and on the contributions of connecting roofs to the bearing capacity of foundation. The analysis results show that the load-displacement curves of the combined caisson foundation are the same as those of the single caisson foundation. Similar to the pile group effect, the vertical bearing capacity of the caisson cannot be fully utilized in the combined foundation. Due to the contribution of the connecting roof between caissons, the vertical bearing capacity of the combined foundation will be greater than the sum of the corresponding numbers of the single suction foundation under a large caisson spacing, and it increases with the increasing caisson spacing. The lateral bearing capacity of the combined foundation is greater than the sum of the corresponding numbers of single suction foundation, and the contribution of connection roof can be neglected.

Key words: suction caisson foundation; bridge engineering; bearing performance; finite element analysis