

超大水下钢沉井施工监测数据分析

王紫超^{1,2,3,4}, 杨切^{1,2}, 陈建荣^{1,2}, 孙南昌^{1,2}

(1. 中交第二航务工程局有限公司, 湖北 武汉 430040; 2. 长大桥梁建设施工技术交通行业重点实验室, 湖北 武汉 430040; 3. 交通运输行业交通基础设施智能制造技术研发中心, 湖北 武汉 430040; 4. 中交公路长大桥梁建设国家工程研究中心有限公司, 北京市 100032)

摘要: 常泰长江大桥 5[#] 墩采用的圆端台形沉井, 为世界最大尺寸水中钢沉井。该文通过现场监测资料以及相关理论方法对 5[#] 沉井施工全过程进行监测分析, 同时研究侧摩阻力的横向分布, 外刃脚踏面土压力对端阻力的影响, 隔墙底部应力分布等。研究表明: 通过及时动态调整可以保证沉井良好的姿态; 沉井首节混凝土浇筑完成后, 已经决定了外隔墙底板的应力大小和分布情况, 但是内隔墙应力在施工前期会大幅提升, 中后期保持稳定; 沉井中后期施工中, 外刃脚踏面端阻力占整个外刃脚端阻力的 35%~55%, 占整个沉井端阻力的 25%~40%, 对沉井下沉影响较大。沉井下沉启动时, 外刃脚踏面土压力会发生明显变化, 而且沉井初沉阶段, 静摩阻力约为动摩阻力的 1.1 倍, 沉井终沉阶段, 静摩阻力约为动摩阻力的 1.6 倍; 侧壁土压力处于主动总压力与被动总压力之间, 同时侧壁土压力均为先增大后平稳再减小, 但减小趋势不明显; 侧壁摩阻力的横向分布存在较大差异, 应分段计算。

关键词: 沉井; 土压力; 侧壁摩阻力; 施工监测; 姿态控制

中图分类号: U443.13+1

文献标志码: A

沉井基础具有刚度大、整体性好、稳定性高以及抗震性能好等优点, 国内外应用十分广泛^[1-4], 20 世纪

以来, 中国陆续修建了泰州长江大桥、南京长江四桥、沪通铁路长江大桥以及五峰山长江大桥等, 均采用了

- [11] HAO Z, RASMUSSEN K. System-Based Design for Steel Scaffold Structures Using Advanced Analysis[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2013, 89: 1-8.
- [12] ZHANG H, CHANDRANGSU R, RASMUSSEN R J R. Probabilistic Study of the Strength of Steel Scaffold Systems[J]. Structural Safety, 2010, 32(6): 393-401.
- [13] REYNOLDS J, ZHANG H, RASMUSSEN K J R. Investigation of U-Head Rotational Stiffness in Formwork Supporting Scaffold Systems[J]. Engineering Structures, 2017, 39: 1-11.
- [14] CIMELLARO G P, DOMANESCHI M. Stability Analysis of Different Types of Steel Scaffolds[J]. Engineering Structures, 2017, 152: 535-548.
- [15] CHAN S L, HUANG H Y, FANG L X. Advanced Analysis of Imperfect Portal Frames with Semirigid Base Connections[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2005, 131(6): 633-640.
- [16] 姚旋. 扣件式高大模板支架初始缺陷计算方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.
- [17] 秦文学. 考虑立柱刚度差异的连续梁超高支架施工技术

- [J]. 公路, 2020, 65(1): 58-62.
- [18] 许涛. 0 号块超高落地式支架施工技术研究[J]. 公路, 2020, 65(3): 163-166.
- [19] 陈彩霞, 沈锐利, 李恒. 悬索桥桥塔横梁施工支架的非线性稳定性分析[J]. 湖南工程学院学报(自然科学版), 2006, 16(3): 91-94.
- [20] 蒋越. 钢管柱-贝雷梁支撑体系稳定承载力研究[D]. 桂林: 桂林理工大学, 2020.
- [21] 官治立, 刘阿明. 大跨度连续刚构桥托架体系设计验算[J]. 中外公路, 2021, 41(2): 107-114.
- [22] KIM S E, CHEN W F. Practical Advanced Analysis for Braced Steel Frame Design[J]. Journal of Structural Engineering, 1996, 122(11): 1 266-1 274.
- [23] WEESNER L B, JONES H L. Experimental and Analytical Capacity of Frame Scaffolding[J]. Engineering Structures, 2001, 23(6): 592-599.
- [24] 李峰. 通廊钢结构风振系数分析[J]. 钢结构, 2011, 26(9): 20-22, 19.
- [25] 龙佩恒, 张佩佩, 陈雅南, 等. 箱梁拆卸满堂支架施工安全控制研究[J]. 北京建筑大学学报, 2019, 35(3): 9-16.

沉井基础。

目前,中国对沉井的受力研究主要集中在沉井施工过程中的下沉系数、端阻力及侧摩阻力等方面。陈晓平^[5]系统分析了沉井基础的下沉机理和下沉过程中的受力特性;穆保岗^[6-7]对沉井结构进行了监控,验证了不同地基极限承载力公式在沉井工程中的适用性;朱建民^[8]发现超大型沉井兼有条形基础的特点和整体工作性能,能够承受较大的竖向变形,沉井首节混凝土浇筑就已决定了隔墙底板的应力大小和分布情况;周和祥^[9]分析刃脚土阻力与侧壁摩阻力的大小和变化规律,考虑了土层前期固结压力对刃脚土阻力的影响,并且提出了侧壁摩阻力分布简化模型;朱劲松^[10]系统研究大型沉井基础下沉过程中侧摩阻力、阻力峰值位置分布、松弛高度与下沉系数的变化规律;邓友生^[11]系统地阐述了大圆形锚碇沉井下沉施工中下沉系数和稳定系数变化规律;刘彦峰^[12]研究了深厚淤泥土层中大型沉井基础下沉阻力的分布特征,侧壁压力沿深度方向近似线性增长,与砂土层受力有明显不同。

国外沉井研究与中国研究有细微差别,Jeong^[13]发现空气幕助沉措施可以有效减少侧摩阻力,加速沉井下沉,侧阻力可以减小到预期值的一半以下;Jitesh^[14]发现刃脚的承载力和土壤流动机理取决于刃脚的形状、下沉深度和土壤类型;Riccardo^[15]以及Gaudio^[16]用桩基础抗震理论来研究沉井抗震机理,考虑了沉井远大于地基土的质量和刚度,并且进行了有限元分析,结果与计算实例吻合良好。

综上所述,沉井主要依靠自重下沉,期间要克服侧壁摩阻力、刃脚端阻力以及浮力。现行的沉井规范主要基于大直径桩的下沉机理分析,或者针对中小沉井得出的。是否适用于地质复杂、尺寸及开挖深度越来越大的沉井有待考证。同时绝大多数文献忽略了刃脚踏面土压力对端阻力的影响,而且侧摩阻力也只考虑侧摩阻力的纵向分布,忽略了侧摩阻力的横向分布研究。常泰长江大桥 5[#]墩沉井为世界最大尺寸圆端形水中沉井,很有必要对其下沉施工进行研究,为以后的水中沉井建造提供参考意见。

1 工程概况

常泰长江大桥主航道桥采用双层斜拉桥,桥梁上层为高速公路,下层为城际铁路和普通公路^[17]。主航道桥两桥塔均采用大型钢沉井基础,主桥 5[#]墩沉井基础平面呈圆端形,立面为台阶形,台阶宽度 9.0 m(图 1)。

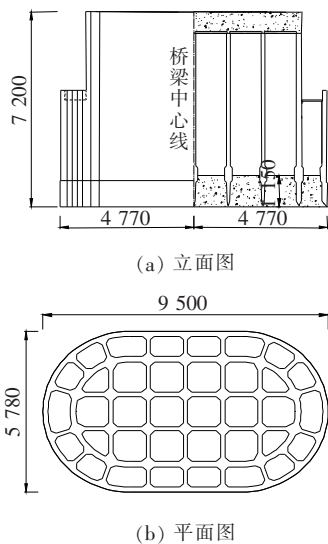


图 1 5[#]墩钢沉井结构(单位:cm)

沉井底面尺寸长 95.0 m、宽 57.8 m,圆端半径 28.9 m;沉井顶面尺寸长 77.0 m、宽 39.8 m,圆端半径 19.9 m;沉井外井壁厚 1.8 m,高 43 m,内井壁厚 2.0 m,高 64 m,内、外圈隔墙厚度均为 1.4 m,外圈隔墙高 64 m,内圈隔墙高 39 m。内井孔标准尺寸为长 11 m、宽 11 m,隔墙、内井壁间倒角 1.5 m、宽 1.5 m 直角,隔墙外井壁间倒角 1.2 m、宽 1.2 m 直角,沉井为填充混凝土的钢壳结构,共 28 个隔舱。

钢沉井所处河段属长江下游感潮河段,潮位受长江径流与潮汐双重影响,20 年一遇桥位断面垂线平均最大流速为 1.93~2.1 m/s,枯水期垂线平均最大流速低于 1.05 m/s。钢沉井位于主航道区北侧,墩位处地形较平稳,河床表层为松散状粉砂,层厚不均,1.6~4.8 m,工程性质差。5[#]墩大部分钻孔的砂类土地层中均揭示有砂砾胶结层,为非层状构造,零星分布,揭示深度主要在河床下 35~45 m,其他深度零星分布。具体特点及施工难点如下:

(1) 水文地质条件复杂,汛期流速大,河床易冲刷、地层不均匀,表层存在硬塑粉质黏土层,沉井初期下沉安全风险及姿态控制难度大。

(2) 沉井结构新颖,采用圆端形台阶形结构,影响设备布置,存在异形隔舱,容易产生取土盲区,临时外壁结构复杂,可拆临时外壁施工难度大。

2 施工监测结果与分析

2.1 下沉曲线

沉井总共经历了 4 次取土下沉、3 次混凝土浇筑、

2次接高,该文研究重点为4次取土下沉期间的沉井姿态及土压力。具体结果如表1、图2所示。

表1 沉井下沉数据统计

项目	日期 (2020年)	时长/ d	下沉 量/ m	平均下 沉速度/ (cm·d ⁻¹)
第1次取土	06.05—06.28	24	3.44	14.3
第2次混凝土浇筑	06.29—07.19	21	0.67	3.2
2次取土下沉	07.20—08.15	27	8.69	32.2
沉井接高	08.16—10.15	61	—	0.1
第3次取土	10.16—12.02	48	16.46	34.3
第3次混凝土浇筑	12.02—12.15	14	0.32	2.3
第4次取土	12.16—12.29	14	6.82	48.7

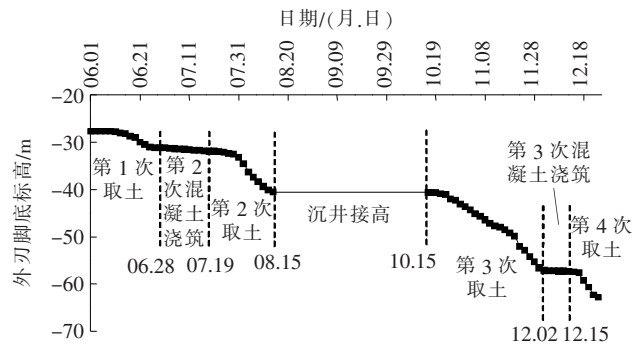


图2 沉井下沉时间历程曲线

第1次取土开挖之前,为了清淤以及减少土层对井壁的侧摩阻力,对河床进行了开挖,沉井外刃脚底标高初始值为-27.2 m。从表1及图2可以看出:在第1次取土初期,沉井下沉较慢,原因在于取土初期,取土高度控制在0.5 m以内,施工过程较保守,平均下沉速度为14.3 cm/d。

经过数值计算^[18],将第2次及第3次取土阶段取土高度均控制在1 m以内,下沉速度加快,其平均下沉速度分别为32.2、34.3 cm/d,下沉速度最大值为1.1 m/d。总结前3次取土经验,第4次取土期间,取土高度控制在1.5 m以内,下沉加快,下沉速度最大值为0.9 m/d,其平均下沉速度为48.7 cm/d。

沉井下沉速度逐渐加快,原因在于加大取土高度可以有效地减少沉井端阻力,提高下沉系数,增加取土量,使沉井可以在保证结构安全的前提下平稳下沉。并且第4次取土期间沉井主要穿过密实中粗砂层以及密实粗砂层,软塑粉质黏土层不存在,具体土层地质情况见表2。

2.2 沉井几何姿态

(1) 测试方法与测点布置

为了监测沉井下沉姿态,确保及时调整沉井姿态,在沉井顶面布置了4个北斗坐标测点,分别布置在沉井顶面的上游、下游、江侧和岸侧,根据实时测量数据动态计算沉井高程、倾斜、偏位和平面扭角等几何信息。

表2 沉井土层地质情况

层号	岩土名称	重度/ (kN·m ⁻³)	压缩模 量/MPa	黏聚 力/kPa	内摩擦角/ (°)	地基承载 力/kPa	摩阻力/ kPa	平均厚 度/m
①3	松散粉砂	19.0	3.80	16.7	14.0	100	20	2.71
②1	硬塑粉质黏土	19.5	6.63	32.9	19.4	260	45	5.52
②3	中密粉砂	20.2	10.19	5.6	31.4	120	22	2.17
②1-1	软塑粉质黏土	18.5	5.93	26.3	19.1	120	30	2.34
②3、②4	中密细砂	19.8	9.66	6.0	34.0	200	22	4.22
②1-1	软塑粉质黏土	18.5	5.93	26.3	19.1	120	30	2.18
②3	中密粉砂	20.2	10.19	5.6	31.4	120	22	6.25
②4	密实细砂	19.4	9.16	4.0	36.0	250	23	8.57
②1-1	软塑粉质黏土	18.5	5.93	26.3	19.1	120	30	1.87
②5	密实中粗砂	20.6	10.52	4.7	37.7	450	24	6.50
②6、②7	密实粗砂	21.3	13.35	4.0	38.0	550	25	8.17

(2) 测试结果与分析——倾斜值

倾斜是沉井几何姿态监控的重要指标之一,其代表了沉井下沉过程中的垂直度,其中顺桥向倾斜与横桥向倾斜的控制值均为1/150。从图3可以看出:第1

次取土期间以及第4次取土期间其顺桥向倾斜与横桥向倾斜值均控制在1/150以内,然而第2次以及第3次取土过程中,横桥向倾斜值存在部分点超过1/150的情况,但是经过及时纠偏,横桥向倾斜值回归正常,

沉井几何姿态总体可控。

(3) 测试结果与分析——平面扭角

平面扭角是沉井几何姿态监控的重要指标之一，代表了沉井下沉过程中沉井底面及顶面的扭转程度，其控制值为 1° 。从图 4 可以看出：4 次取土期间其平面扭角均控制在 0.01° 以内，沉井扭转姿态良好。

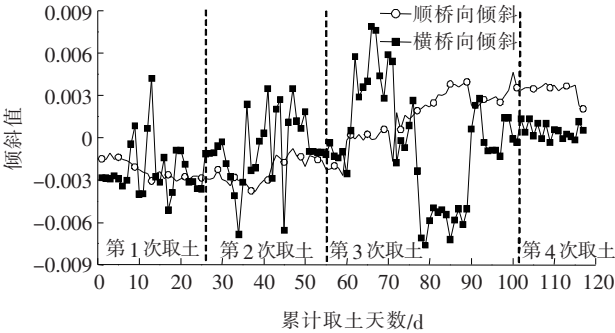


图 3 沉井倾斜曲线

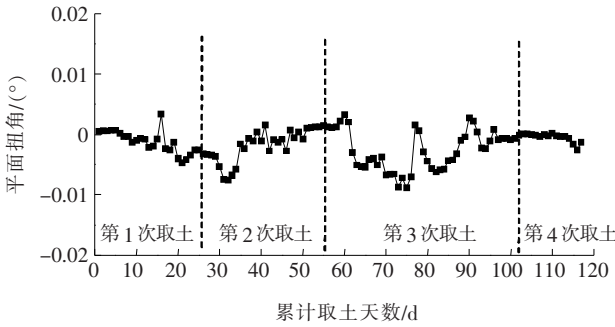


图 4 沉井平面扭角曲线

2.3 隔墙底部应力监测

(1) 测试方法与测点布置

隔墙底部的结构应力用于监测隔墙底部的钢板结构应力，是沉井基础定位着床及终沉等阶段的控制结构安全性的重要指标，使用振弦式应变计测得，测点布置如图 5 所示。

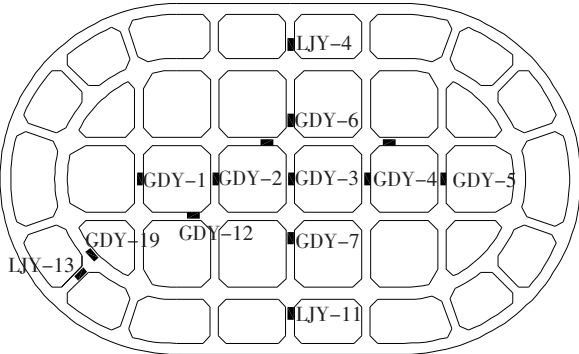
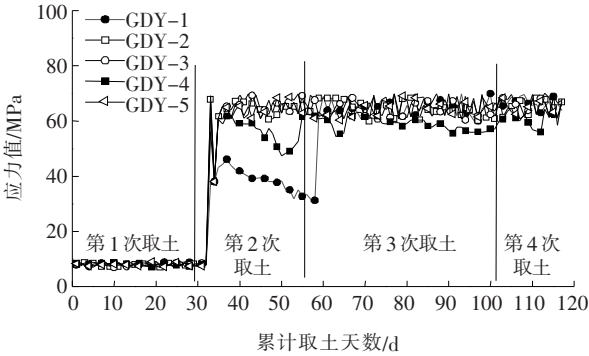


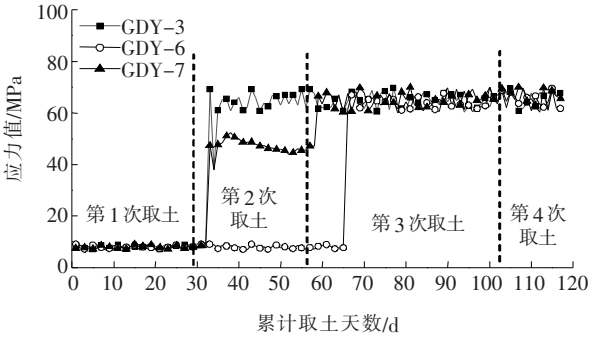
图 5 隔墙底部应力监测点布置图

(2) 测试结果与分析

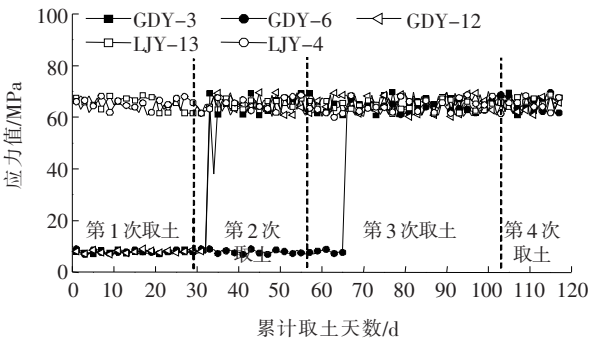
隔墙底部应力测试结果如图 6 所示。



(a) 横桥向隔墙底部应力



(b) 顺桥向隔墙底部应力



(c) 外隔墙-内隔墙底部应力

图 6 隔墙底部应力曲线

从图 6(a)、(b)可以看出：在第 1 次取土阶段，应力值均为 8 MPa 左右，说明整个沉井中部区域整体工作性能良好。在经历了 2 个月的沉井接高以后，即第 2 次取土初期，其应力值在几天之内迅速达到 60 MPa 左右，原因在于此时沉井入土较浅，沉井自重增大，同时沉井中部区域底部完全被掏空，因此中部区域应力增大。但是第 2 次取土之后，其值约为 60 MPa，远小于钢板屈服应力，原因可能为此时沉井入土较深，周围土体对沉井底板约束力增强，限制了沉井底板变形，这种限制对沉井受力是有利的。在第 2 次取土期间，GDY-1、GDY-6 以及 GDY-7 应力曲线有些许不

同,原因在于,其隔墙底部较其他隔墙底部未完全被掏空,仍有部分土体支撑,钢板局部应力降低。

图 6(c)为外隔墙—内隔墙底部应力曲线图,在 4 次取土过程中,LJY-4、LJY-13 测点处应力。始终保持在 60 MPa 左右,说明沉井首节混凝土浇筑完成后,已经决定了外隔墙底板的应力大小和分布情况,这与文献[8]中关于隔墙应力的描述类似。

2.4 刃脚踏面及斜面土压力监测

许多大型沉井外刃脚踏面宽度为 20 cm 左右,例如五峰山长江大桥、马鞍山长江大桥以及该文的常泰长江大桥等,相较于整个外刃脚 200 cm 宽度,占比量为 1/10,较少有文献研究,文献[5-10]未曾提及,但是该文通过研究发现其影响较大。

(1) 测试方法与测点布置

底面土压力用于监测沉井基础下沉过程中的端面阻力大小及其分布规律,是确定下沉阻力的关键指标。使用土压力盒测得,测点布置见图 7。其中 RF-5、RF-78 以及 RF-88 为斜面监测点,与它们对应的踏面监测点为 RF-125、RF-124 以及 RF-121。

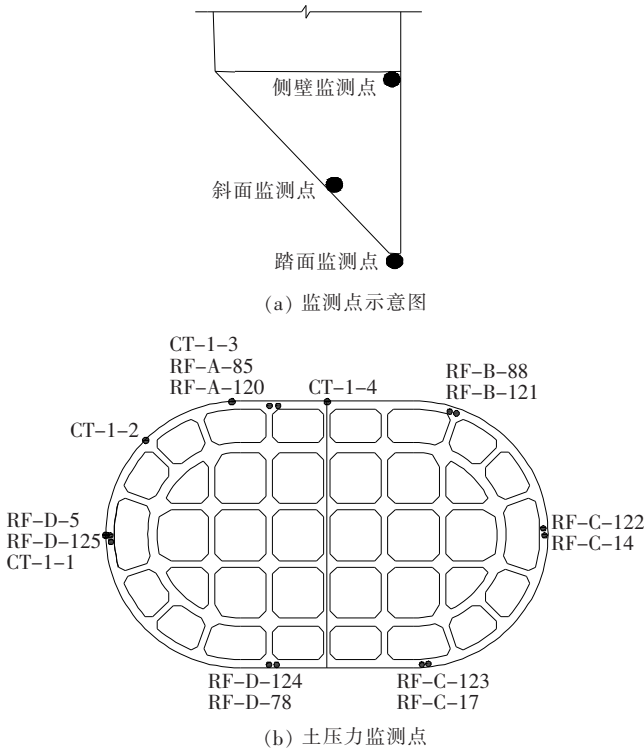


图 7 土压力传感器监测点

(2) 测试结果与分析

刃脚踏面及斜面土压力测试结果见图 8。

由图 8 可知:踏面土压力值远高于斜面土压力值,踏面平均土压力值约为 4 MPa,原因在于随着施工过

程推进,沉井入土深度加大,原本处于刃脚周围的固结土及石块被进一步堆积,外刃脚踏面土层进入了超固结的状态^[19],甚至外刃脚踏面部位极有可能一直存在石块,随外刃脚一起下沉,因为理论上密实粗砂的极限承载力不会超过 2 MPa;斜面平均土压力约为 1 MPa,处于正常范围内。同时在沉井中后期施工过程中,研究发现外刃脚踏面端阻力占了整个外刃脚端阻力的 35%~55%,占整个沉井端阻力的 25%~40%,对沉井下沉影响较大。

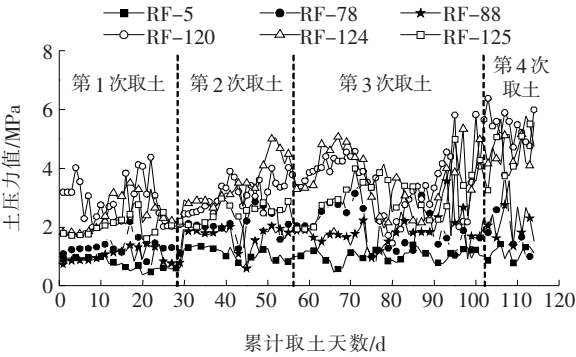


图 8 刃脚踏面及斜面土压力曲线

由于外刃脚踏面土压力数值较大,沉井下沉启动时,理论上数值变化较大,容易被系统监测。在沉井终沉阶段,由于需要控制下沉量,取土效率降低,而且沉井属于非连续下沉。在沉井启动时,会出现快速下沉现象,时间很短。究其原因在于沉井侧摩阻力由静摩阻力变成了动摩阻力,并且随着下沉深度增加,两者差异越来越大,根据实测刃脚底面土压力数值可以反算侧摩阻力,得出在沉井初沉阶段,静摩阻力约为动摩阻力的 1.1 倍,沉井终沉阶段,静摩阻力约为动摩阻力的 1.6 倍,这与文献[20]规律相似。

(3) 沉井下沉启动分析

沉井下沉启动前后踏面土压力曲线如图 9 所示。

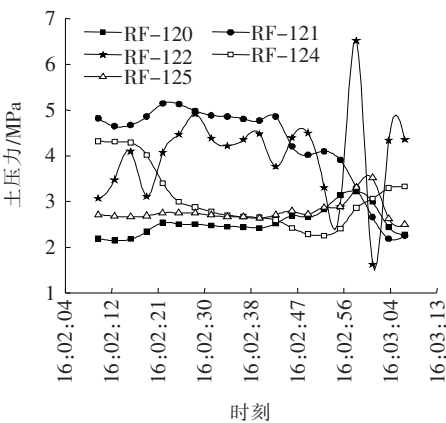


图 9 下沉启动前后踏面土压力曲线变化图

沉井下沉启动从开始到结束,时间约为 8 s,5# 沉井于 2020 年 12 月的 20 号、22 号以及 25 号均发生过下沉启动,下沉量分别为 12.7 以及 5 cm。研究了 20 号下午 16:02—16:03 外刃脚踏面土压力曲线,如图 9 所示,在下沉启动前 30~40 s,RF-122 土压力曲线会产生规律性的上下波动,波动幅度为 2 MPa,变化较大,其他曲线较平缓,这可能与下沉启动最先开始的位置有关。下沉启动过程中 RF-122 曲线发生了突变,先迅速上升,再迅速下降,曲线最大值为 6.5 MPa,最小值为 1.5 MPa,其他曲线也会出现小范围上升或者下降,其余几次下沉启动也有类似规律。

2.5 沉井侧壁土压力监测

(1) 测试方法与测点布置

沉井侧壁土压力监测可反映沉井周边土体应力状态,为翻砂提供预警。使用土压力盒测得,测点布置如图 7,编号为 CT-1-1~CT-1-4。

(2) 测试结果与分析

文献[5-10]得出纵向侧摩阻力两端小、中间大的规律,并且简化侧摩阻力计算模型,但是忽略了侧壁摩阻力的横向分布。

该文首先根据表 2 以及《土力学与地基基础》^[21]分别计算了每层土的顶面及底面的主动土压力与被动土压力,并且考虑水自重应力。如图 10 所示,侧壁土压力均处于主动总压力与被动总压力之间,而且随着入土深度加大,侧壁土压力更接近于主动总压力。同时侧壁土压力均为先增大后平稳再减小的趋势,但是减少趋势不明显,说明刃脚处土压力松弛效应影响随着入土深度加大逐渐增大,这也可能与该文 2.4 小节说明的原因有关。

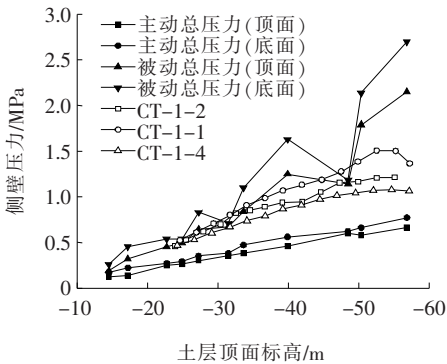


图 10 侧壁水土总压力图

如图 10 所示,对于横向分布不同的 CT-1-1、CT-1-2 以及 CT-1-4,同一土层同一标高处的侧壁压力值逐渐减小,并且差值最大可达 0.4 MPa,说明

侧壁摩阻力的横向分布存在较大差异,原因在于沉井圆端处容易应力集中,而且各处土层不均匀,为了较准确地计算侧摩阻力,应分段计算。同时该文对侧壁摩阻力的横向分布讨论较浅,需要进一步研究。

2.6 土压力占比分析

该文分析了施工期间,总阻力中端阻力与侧摩阻力各自占比量,这对沉井中后期施工具有重要的指导意义,施工阶段前期,沉井入土深度较浅,总阻力主要占比为端阻力,施工阶段中后期,沉井入土深度加大,达 30 多米,侧摩阻力成为影响沉井下沉的主要因素。纵观施工全过程,端阻力从 100%变化到 40%,侧摩阻力从 0%变化到 60%。

同理,由于沉井平面尺寸较大,端阻力分布也较复杂,有必要对其研究。该文中沉井的支撑状态主要有 3 种:全断面支撑、小锅底支撑、大锅底支撑^[22]。刃脚各部分土压力占比如表 3。

表 3 端阻力占比量

部位	端阻力占比/%		
	全断面状态	小锅底状态	大锅底状态
外井壁	35	55	75
外隔墙	25	19	14
内井壁	20	14	8
内隔墙	10	12	3
十字节点	10	0	0

3 结论

(1) 施工过程监测与控制结果表明:整个沉井下沉过程中,下沉速度最大值为 1.1 m/d,通过及时动态调整,沉井整体姿态控制较好。

(2) 沉井首节混凝土浇筑完成后,已经决定了外隔墙底板的应力大小和分布情况,但是中部内隔墙应力在施工前期由于入土较浅、底部土体被掏空等因素会大幅提升,中后期由于沉井周围土体对沉井底板约束力增强,限制了沉井底板变形,对结构受力有利,中部内隔墙应力保持稳定,为 60 MPa 左右。

(3) 通过沉井中后期的施工研究,发现外刃脚踏面端阻力占整个外刃脚端阻力的 35%~55%,占整个沉井端阻力的 25%~40%,对沉井下沉影响较大。沉井下沉启动前,外刃脚踏面土压力会发生明显变化,且沉井初沉阶段,静摩阻力约为动摩阻力的 1.1 倍,沉井终沉阶段,静摩阻力约为动摩阻力的 1.6 倍。

(4) 侧壁土压力处于主动总压力与被动总压力之间,而且随着入土深度加大,侧壁土压力更接近于主动总压力。同时侧壁土压力均为先增大后平稳再减小的趋势,但是减小趋势不明显,说明刃脚处土体压力松弛效应随着入土深度加大对沉井影响逐渐增大。

(5) 侧壁摩阻力的横向分布存在较大差异,原因在于沉井圆端处容易应力集中,而且土层不均匀,为了较准确地计算侧摩阻力,应分段计算。

参考文献:

- [1] CHAKRABARTI S K. Design, Construction, and Installation of a Floating Caisson Used as a Bridge Pier[J]. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, 2006, 132(3): 143—156.
- [2] LEFLER F. E. Reinforced Concrete Caissons for Port Structures in Spain[J]. Maritime Engineering, 2009, 162(2): 73—81.
- [3] PENG F L, WANG H L, TAN Y, et al. Field Measurements and Finite Element Method Simulation of a Tunnel Shaft Constructed by Pneumatic Caisson Method in Shanghai Soft Ground[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2010, 137(5): 516—524.
- [4] JALBI S, SHADLOU M, BHATTACHARYA S. Impedance Functions for Rigid Skirted Caissons Supporting Offshore Wind Turbines[J]. Ocean Engineering, 2018, 150(2): 21—35.
- [5] 陈晓平, 茜平一, 张志勇. 沉井基础下沉阻力分布特征研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(2): 148—152.
- [6] 穆保岗, 朱建民, 牛亚洲. 南京长江四桥北锚碇沉井监控方案及成果分析[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(2): 269.
- [7] 穆保岗, 王岩, 朱建民, 等. 大型沉井实测下沉阻力分析[J]. 土木建筑与环境工程, 2012, 34(S1): 107—115.
- [8] 朱建民, 龚维明, 穆保岗, 等. 超大型沉井首次接高受力及变形规律初探[J]. 岩土力学, 2012, 33(7): 2 055—2 060, 2 066.
- [9] 周和祥, 马建林, 李军堂, 等. 深大沉井下沉阻力的现场监测[J]. 公路交通科技, 2019, 36(7): 81—89.
- [10] 朱劲松, 孟庆领, 祁海东, 等. 大型沉井基础侧壁摩阻力分布特性[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2019, 49(6): 1 136—1 143.
- [11] 邓友生, 刘华飞, 时一波, 等. 特大圆形锚碇沉井下沉系数和稳定系数研究[J]. 世界桥梁, 2016, 44(1): 35—39.
- [12] 刘彦峰, 刘少成, 黄锐. 深厚淤泥土层大型沉井基础下沉阻力研究[J]. 世界桥梁, 2020, 48(3): 58—62.
- [13] JEONG Jin Seob, LEE Jong Cheon, KIM Hae Woog, et al. A Case Study on Settlement Promotion of a Large Size Open Caisson Using Air-Jet an Method[J]. Journal of Navigation and Port Research, 2009, 33(3): 227—233.
- [14] CHAVDA Jitesh T, MISHRA Soumyaranjan, DODAGAUDAR G. R. . Experimental Evaluation of Ultimate Bearing Capacity of the Cutting Edge of Open Caisson[J]. International Journal of Physical Modelling in Geotechnics, 2019: 1—43.
- [15] RICCARDO Conti, RAFFAELE Di Laora, VALERIA Licata, et al. Seismic Performance of Bridge Piers: Caisson Vs Pile Foundations[J]. Soil Dynamics & Earthquake Engineering, 2020, 130: 105 985.
- [16] GAUDIO D. , RAMPELLO S. . Equivalent Seismic Coefficients for Caisson Foundations Supporting Bridge Piers[J]. Soil Dynamics & Earthquake Engineering, 2020, 129: 105 955.
- [17] 秦顺全, 徐伟, 陆勤丰等. 常泰长江大桥主航道桥总体设计与方案构思[J]. 桥梁建设, 2020, 50(3): 1—10.
- [18] 赵东梁, 沈立龙, 李嘉成. 水中巨型台阶形沉井取土下沉计算分析[J]. 中国港湾建设, 2020, 40(10): 45—50.
- [19] 孟颂颂, 李德营, 李仕波, 等. 不同前期固结压力下粉砂类滑带土抗剪强度环剪试验研究[C]. 2016年全国工程地质学术年会论文集, 2016.
- [20] 施洲, 李思阳, 杨仕力, 等. 超大型沉井基础下沉中后期摩阻力特性及突沉机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(S2): 622—632.
- [21] 孔军. 土力学与地基基础[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008.
- [22] 穆保岗, 朱建民, 龚维明. 大型沉井设计、施工及监测[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.