

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.2020.12.037

大型沉井在软土地基中下沉现场监测

陈豪¹, 瞿和瓿¹, 杨克军²

(1. 温州市城市道路建设研究中心, 浙江 温州 325000; 2. 温州设计集团有限公司, 浙江 温州 325000)

摘要:以温州市鹿城区七都岛—铁塔公园段跨瓯江电力隧道工程七都岛侧沉井基础为研究对象,对沉井在软土地基中下沉进行监测研究,通过现场监测数据分析,对沉井侧摩阻力、刃脚底部压力、沉井外土面沉降进行分析,得出沉井在软土地基中的下沉特性,这对理论研究与实际工程设计都有参考意义。现场监测数据结果表明:在软土地基中沉井侧摩阻力随着沉井入土深度的增加呈线性增加,到达一定峰值后缓慢降低;下沉过程中刃脚土压力的波动较为剧烈,其中刃脚斜面阻力占同一深度踏面阻力的10%左右;沉井下沉对周边土体沉降的影响范围比沉井在其他土体中小10%左右,为沉井下沉深度的10%左右。

关键词:沉井;软土地基;下沉阻力;土体沉降

中图分类号: U455.4

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2020)12-0130-05

0 引言

沉井是筒状的结构物,施工时先井内挖土,再依靠自身重力克服井壁与土体之间的摩阻力、刃脚反力、水的浮力等下沉到设计标高,然后封底,使其成为建筑物的基础。沉井还是深基础的重要形式之一,在国外的桥梁、矿山、港口及水利水电工程中广泛采用^[1-4]。国内沉井作为锚碇基础被广泛运用于各种悬索桥的下部基础中,沪通长江大桥沉井锚碇系统中最大的沉井尺寸为长86.9 m、宽58.7 m、高115 m,创造了当时的亚洲纪录^[5]。泰州大桥的南锚碇为长67.9 m、宽52 m、高41 m的沉井基础^[6]。

目前在关于沉井下沉受力特性方面,研究方法主要包括工程现场原位监测、室内模型试验、数值模拟及理论推导等手段。穆保岗等^[7]对南京长江四桥北锚碇沉井进行了下沉期间沉井应力应变和土压力的监控。蒋炳楠^[8]等监测了超深大沉井在水中施工期间的侧压力,得出侧压力的主要影响因素为沉井倾斜、沉井埋深和压力松弛影响范围等。陈晓平等^[9]研究了沉井基础下沉阻力分布特征。徐伟^[10]对环形沉井刃脚斜侧面基础地基极限承载力进行了分析研究。闫富有等^[11]对沉井下沉过程中刃脚的极限土阻力进行了分析研究。在室内模型试验方面,周和祥等^[12]利用离心机进行了沉井模型试验。王建^[13]对沉井进行室内模型试验,得出了沉井侧壁摩阻力先增加后减小的变化特点。穆保

岗等^[14]对沉井进行了下沉期间细观试验,探究了井外土颗粒的变化特点。黄迪等^[15]对大型沉井下沉过程的应力变化进行实测,并用Abaqus有限元模拟对比分析。

在东南沿海地区软土地基广泛存在,其中有大量的淤泥、淤泥质黏土、淤泥夹粉砂等,该类土具有高含水率、抗剪强度低、大孔隙比、地基承载力低等一系列不利于工程的特性。传统大型沉井的承载力大且位移小,但是在软土地区下沉施工期间会出现沉井的突沉、超沉、井体倾斜、沉井偏移、影响周围环境等复杂情况。本文为了保证大型沉井在软土地基中的顺利下沉,对下沉过程进行了实时监控,在沉井壁上布置了钢筋应力计及土压力盒,用于测量沉井的侧摩阻力、侧壁土压力、刃脚底部及斜面的土压力。研究侧摩阻力和土压力在沉井下沉和接高施工期间的数值大小、分布特征、变化规律及影响因素,为大型沉井在软土地基中下沉阻力计算方法的改进积累研究基础,并为同类在软土地基中下沉的沉井设计和施工提供参考。

1 工程概况

温州市瓯江电力隧道工程是为了满足温州滨江商务区的高端定位功能而成立的项目,七都岛与鹿城区铁塔公园之间的高压铁塔的存在阻断了区内空间格局,影响了该区作为滨江商务区的定位,不利于周边土地的综合开发利用,同时对滨江景观产生不良影响,从而对区域发展产生负效应。而该区220 kV商务变电外接地电力管廊项目,能有效衔接瓯江两岸电缆入地,更好地发挥杨府山

收稿日期: 2020-05-22

作者简介: 陈豪(1977—),男,本科,高级工程师,从事市政道路桥梁建设管理工作。

CBD 的作用。因此有必要对七都岛与鹿城区铁塔公园段的越江电缆进行埋地化改造。

该项目拟建电力隧道南起瓯江路，北至七都岛樟里中路东侧。拟建工程主要由电力隧道、顶管工作井和接收井组成,效果图如图 1 所示。

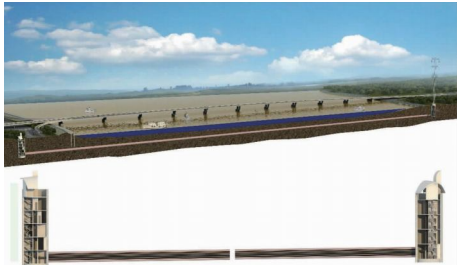


图 1 跨瓯江电力隧道工作井效果图

其中七都侧沉井内径为 $\phi 12\text{ m}$,壁厚 1.1 m,总高度 32.42 m,距离外径 3 m 采用单排深 20 m 拉森桩做止水帷幕;瓯江路侧沉井内径为 $\phi 12\text{ m}$,壁厚 1.1 m,总高度 30.42 m,距离外径 2.7 m 采用单排深 19.5 m 拉森桩做止水帷幕;两个出洞口加固范围为 $6.14\text{ m}\times 6.14\text{ m}\times 6\text{ m}$,采用高压旋喷桩地基加固。沉井井壁、底板混凝土强度等级为 C40,抗渗等级为 P12,混凝土垫层强度等级为 C30 水下混凝土。

本文以七都侧沉井作为研究对象,施工现场如图 2 所示。沉井施工时主要涉及的土层为黏土、淤泥夹砂、夹砂淤泥、淤泥。沉井封底时,刃脚处于淤泥层。



图 2 沉井施工图

2 工程地质

2.1 施工场地周围环境

七都侧井位于樟里村中路东侧的农田内,外井壁西北侧距离浮沙赤岩庙围墙 13.78 m(砖砌结构),距离主殿 25 m(砖砌结构),井外壁东侧距离邻近高压塔 16.87 m(桩基础采用 16 根深 35 m 钻孔灌注桩),如图 3 所示。

工程区内地表水主要为瓯江江水,地下水为鹿城区瓯江路一侧及七都岛一侧的地下潜水及承压水。地表水主要受潮汐影响较大,与地下水存在一定水力联系;地下潜水主要赋存于淤泥夹粉砂



图 3 沉井周围环境

层、粉砂含淤泥层;地下承压水主要赋存于粉砂含淤泥层、黏质粉土层及卵石层。勘察期间 CK1 钻孔揭示水位深度为 3.7 m,地下潜水与瓯江存在一定水力联系,施工时应现场测量水位深度;参照邻近工点承压水特性,粉砂含淤泥层承压水水位高程约为 0.7 m。水位高度受瓯江江水影响,在动水作用下易引起流土、流砂等,增加沉井下沉难度,且易危及施工人员及结构安全,应采取必要的隔水、降水措施。由勘察报告得出详细的地基土构成和物理力学性质见表 1、表 2。

2.2 沉井施工要点

沉井高度大、直径小,下沉垂直度控制、下沉稳定性控制难度高。七都岛工作井总高度 32.42 m,最大直径 14.2 m,长细比为 2.27 : 1,在温州地区实属罕见,以往类似工程经验较少。由于长细比大,沉井初沉时垂直度控制难度高;初沉阶段是沉井的关键时刻,这时井的下沉系数大、重心高、稳定性差,因此冲土时要均匀对称,每隔 2 h 测量一次,严格控制偏差。另外由于下沉深度超深,沉井下沉至后阶段时,需预防下沉困难或者突沉等不良现象。

沉井外井壁西北侧距离浮沙赤岩庙围墙 13.78 m,距离主殿 25 m(砖砌结构),寺庙基础较浅,对地下土体的扰动反应敏感。因此该沉井下沉施工过程中对周围土体沉降控制要求高。

根据沉井下层标高和地质资料,前半部分沉井下沉穿越含水砂层,水位高度受瓯江江水影响,在动水作用下易引起流土、流砂等,增加沉井下沉难度,且易危及工作人员及结沉安全,需采取必要的隔水、降水措施。因此控制地下承压水对沉井下沉的影响是该工程施工主要控制点。

2.3 沉井施工制作过程

该沉井采用六节制作二次下沉,起沉标高 0.9 m,

表 1 地基土的构成与特征

岩土名称	平均层厚 /m	层顶高程 /m	土层描述
杂填土	2.65	5.02	杂灰、浅灰、灰黄色,稍湿,松散至稍密状,成分主要由建筑垃圾、碎砾石、砂和黏性土组成;局部见大块石、碎石,块石占比 15%,碎石占比 30%,其余为砂粒、粉粒、黏粒,分选性差,土质均匀性差
黏土	1.23	2.46	灰黄色,流塑至可塑状,很湿,中高压缩性,含少量铁锰质氧化斑点、粉细砂、半炭化物,局部相变为黏土
淤泥夹粉砂	3.86	0.67	灰色、浅灰黄色,流塑状,饱和,高压缩性,土层不均匀,含少量贝壳碎屑、半炭化植物碎屑;粉砂含量 5%~10%,局部稍多,呈微层至薄层状分布,局部团块状
淤泥	2.2	3.37	浅灰黄色、灰色,流塑状,高压缩性,土层不均匀,含少量贝壳碎屑、半炭化植物碎屑;呈微层至薄层状分布,局部团块状
粉砂含淤泥	6.09	-6.79	灰色,饱和,稍密,中低压缩性,淤泥含量 10%~40%,分布不均,含少量贝壳碎屑、半炭化植物碎屑,偶见姜石
淤泥	18.47	-12.88	青灰色,软塑至流塑状,饱和,高压缩性,粉砂、细砂含量 5%~15%不等,局部稍多,夹薄砂层,偶见贝屑,七都岛一侧钻孔揭示砂含量偏高
粉砂含淤泥	3.4	-28.48	灰色,饱和,稍密状,中低压缩性,淤泥含量 10%~20%,分布不均,含少量贝壳碎屑、半炭化植物碎屑,偶见姜石
淤泥质黏土	10.76	-33.34	灰色,软塑至流塑状,饱和,中高压缩性,呈细鳞片状,砂含量 10%~30%,土层分布不均,夹薄砂层,呈互层状
黏土	1.3	-44.24	灰色,软塑,饱和,中压缩性,呈细鳞片状,土层分布均匀,夹薄砂层,呈互层状
黏质粉土	1.74	-44.26	灰色,饱和,密实,低压缩性,分布均匀

表 2 地基土物理力学性质

土 层 名 称	压缩模量 E_{s1-2}/MPa	地基土容许 承载力 $[f_{a0}]/\text{kPa}$	钻孔灌注桩桩侧土 摩阻力标准值 q_s/kPa	沉井外壁与土体间 的单位摩阻力 q/kPa	旋喷桩或搅拌桩桩 侧土摩阻力特征 $/\text{kPa}$
黏土	2.42				
淤泥夹粉砂	2.11	60	11	14	5
粉砂含淤泥	6	70	22	23	13
淤泥	3.16	50	10	12	5
粉砂含淤泥	6.08	150	28	25	13
淤泥质黏土	3.29	120	20	20	11
黏质粉土	8.55	200	50	25	
卵石	30	300	140	28	

注:1.表中除 E_{s1-2} 值为试验值(卵石压缩模量为建议值),其余为建议值。
2.采用泥浆助沉时,沉井外壁与土体间的单位摩阻力 q 按 3~5 kPa 取值。
3.沉井外壁单位摩阻力分布在 0~5 m 深度内,单位摩阻力从 0 按直线增加,大于 5 m 时为常数;沉井竖向跨越多种类型土层时,单位摩阻力可按各土层厚度取加权平均值。
4.沉井外壁与土体间的单位摩阻力参引《市政工程勘察规范》(CJJ 56—2012)。

第一节、第二节、第三节制作共 16.2 m,采用排水和不排水下沉相结合的工艺,下沉至标高 -14.1 m,地面以上预留 1.2 m;第四节、第五节、第六节制作共 16.22 m,采用排水下沉,下沉至标高 -31.52 m。沉井下沉深度曲线随时间变化曲线如图 4 所示。

3 现场监测成果及分析

3.1 侧摩阻力变化分析

目前工程实际中对于沉井侧摩阻力的计算以经验法为主,而经验法^[16]并不能精确测量侧摩阻力,不应适用于理论研究。由于沉井表面接触的每

种土层特性各不相同,测量每种土层的摩擦系数较为烦琐且误差较大,故采取土压力盒测量侧壁土压力换算的方法测量侧壁土压力也不能实现。

本文通过测量上、下两段分节处钢筋应力计的应力差来求侧摩阻力,先测得上、下端垂直方向的内力值,并考虑自重应力因素,其原理及方法如图 5 所示。图中 F 为第 i 节沉井侧面摩阻力; F_i 为第 i 节沉井下端断面的内力; F_{i-1} 为第 i 节沉井上端断面的内力; W_i 为第 i 节沉井自重。

由下式可以求得第 i 节沉井侧面摩阻力:

$$F=F_{i-1}-F_i+W_i \tag{1}$$

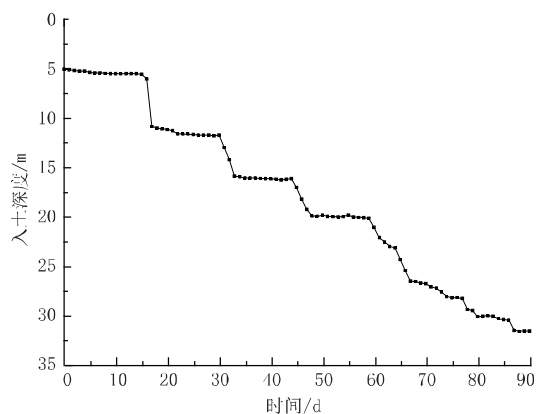


图 4 沉井下沉曲线

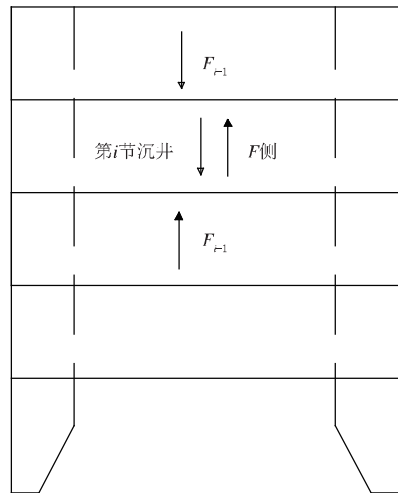


图 5 沉井受力示意图

由于沉井施工过程中对井壁周围土体的扰动不大,且沉井结构刚度大,在水平断面上均匀布置 4 个钢筋计并取其平均值,沿沉井长度每 6 m 布置一个钢筋计,共计 20 个钢筋计测点,同时在相同深度的位置布置土压力盒。测点布置如图 6 所示。

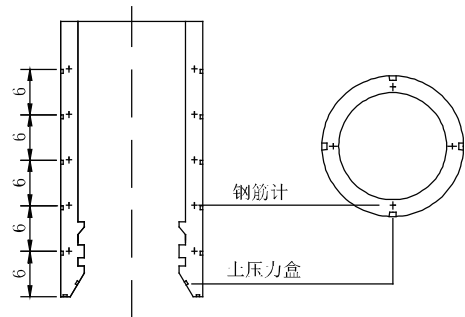


图 6 沉井测点分布图

沉井侧壁土压力随下沉深度的变化曲线如图 7 所示,从试验数据的变化来看,侧壁土压力随着入土深度接近线性增加,在一定深度达到峰值后减小。原因是沉井下沉到一定深度时,井内土体高度小于井外土体高度,在刃脚的内、外侧形成压力差,使刃脚外侧土体有向内侧移动的趋势,如图 8 所示。

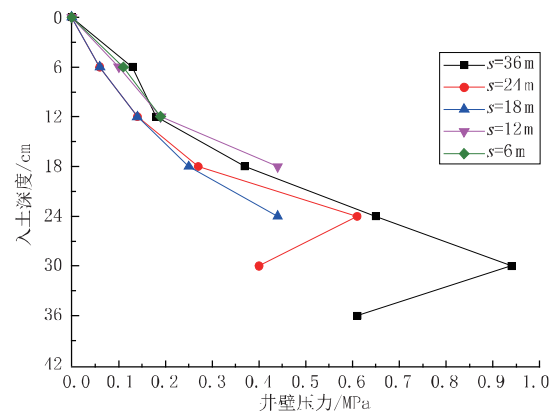


图 7 沉井侧壁土压力分布

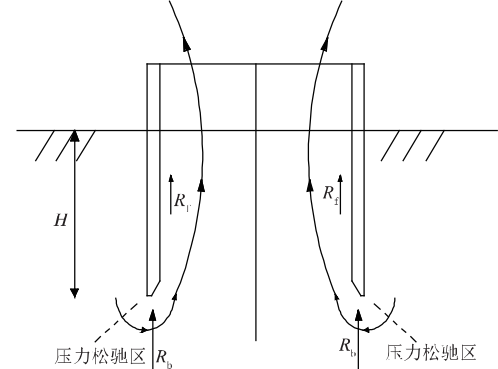


图 8 沉井下沉受力特征

根据现场监测数据可以得出摩阻力沿沉井入土深度的分布,如图 9 所示。从摩阻力变化曲线来看离刃脚底部 6 m 处摩阻力比其他的摩阻力要大。分析原因,在离刃脚 8 m 左右时使用了井壁涂刷沥青柏油涂层结合泥浆套的减摩措施,说明井壁涂刷沥青柏油涂层结合泥浆套的助沉效果比较明显,起到明显的减小阻力作用,距离出浆口最近的 12 m 处效果更加明显。

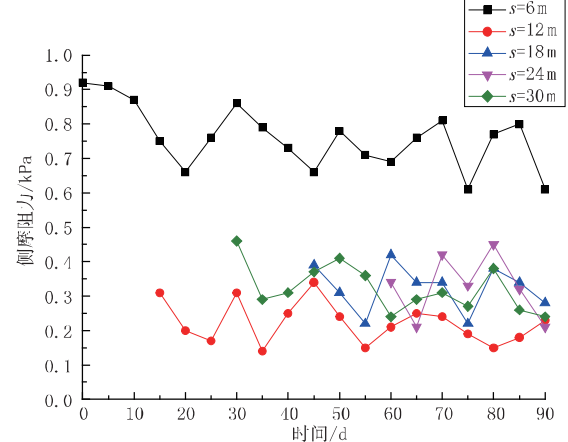


图 9 沉井侧摩阻力分布

3.2 刃脚阻力变化分析

沉井刃脚踏面与斜面土压力随沉井入土深度分布曲线如图 10 所示。由图可知,刃脚踏面及斜面的土压力随着深度的增加有剧烈波动,下沉中

实测的刃脚斜面反力比刃脚踏面反力要小很多,仅为10%左右。出现此现象的原因是在实际工程中沉井的左右倾斜会对刃脚底部压力造成较大影响,且下沉过程中采用吸泥下沉时,对刃脚斜面附近的泥土也有冲吸作用,会带走刃脚附近的土体,导致刃脚斜面的反力小于理论值。

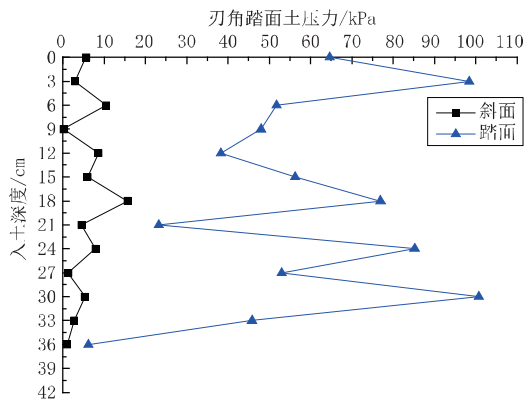


图10 刃脚土压力随沉井下沉分布

3.3 沉井周围土体沉降

从观测结果来看,尽管试验时尽量保持井内取土的均匀性,但沉井的下沉并不是匀速的,而基本都表现为小幅突沉的形式。图11为沉井周边的土面沉降,从图中可以看出,靠近沉井外壁土面随着刃脚附近的土体被带下而产生明显沉降,随着离沉井外壁距离的增大,土体沉降慢慢减小,到一定距离后沉降可忽略不计。从图中可以看出,土体的沉降最大值为40 cm处左右,沉降影响范围在沉井高度的10%处左右,比传统沉井下沉影响范围降低了10%左右。

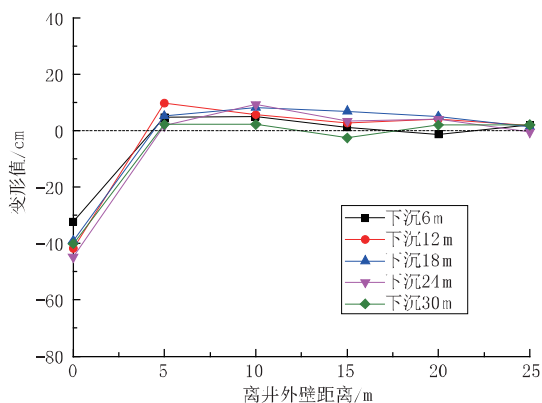


图11 沉井外土面沉降

4 结 语

相对于其他沉井下沉监测研究,本文探究的是沉井在软土地基中下沉的受力变化特征及周边土体沉降影响。在沿海地区广泛分布的软土地基对于沉井基础的下沉具有较好的指导性,从而更

好地帮助沉井设计与施工实践,国内外在这方面的的工作较为欠缺,还有很多方面可以探究。本文通过现场检测得出以下研究成果:

(1)沉井在软土地基中下沉时,沉井侧壁土压力随着沉井入土深度的增加呈线性增加,到达一定峰值后缓慢降低;沉井侧摩阻力随着沉井入土深度的增加波动较大,施工过程中使用井壁涂刷沥青柏油涂层结合泥浆套的减摩措施能有效减少沉井的侧摩阻力。

(2)在沉井的下沉和接高过程中,会导致沉井倾斜,刃脚土压力随沉井入土深度的增加波动较大,其中刃脚斜面阻力占同一深度踏面阻力的10%左右。

(3)沉井在软土地基中下沉对周边土体沉降的影响范围比沉井在其他土体中小10%左右,为沉井下沉深度的10%左右。

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] Leffler F E. Reinforced concrete caissons for port structures in Spain[J]. Maritime Engineering, 2009, 162(2): 73-81.
- [3] Allenby D. Examples of open caisson sinking in Scotland[J]. Geotechnical Engineering, 2009, 162(1): 59-70.
- [4] Waley G, Allenby D, Kilburn D. Examples of open caisson sinking in Scotland[J]. Geotechnical Engineering, 2009, 162(1): 59-70.
- [5] 李军堂. 沪通长江大桥主航道桥沉井锚碇系统设计[J]. 桥梁建设, 2017, 47(3): 1-6.
- [6] 陶建山. 泰州大桥南锚碇巨型沉井排水下沉施工技术[J]. 铁道工程学报, 2009(1): 63-66.
- [7] 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): 269-274.
- [8] 蒋炳楠, 马建林, 褚磊, 等. 水中超深大沉井施工期间侧压力现场监测研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(4): 1551-1560.
- [9] 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.
- [10] 徐伟. 环形沉井刃脚侧面基础地基极限承载力分析[J]. 华中科技大学学报, 2013, 41(7): 27-41.
- [11] 闫富有, 时刚. 沉井下沉过程刃脚的极限土阻力分析[J]. 岩土力学, 2013, 34(S1): 80-87.
- [12] 周和祥, 马建林, 张凯, 等. 沉井下沉阻力离心模型试验研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(10): 3969-3976.
- [13] 王建. 沉井侧壁摩阻力室内试验研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(3): 659-666.
- [14] 穆保岗, 别倩, 赵学亮, 等. 沉井下沉期荷载分布特征的细观试验[J]. 中国公路学报, 2014, 27(9): 49-56.
- [15] 黄迪, 朱劲松, 祁海东. 大型沉井下沉过程的应力变化规律[J]. 交通科学与工程, 2018, 34(1): 40-49.
- [16] 穆保岗, 朱建明, 龚维明. 大型沉井设计、施工及检测[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.