

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2025.05.010

深埋输水管道圆形大直径沉井顶管施工技术及其变形影响分析

武涛¹, 问英杰¹, 蒋望涛², 王建望³

(1. 中铁一局集团第五工程有限公司, 陕西 宝鸡 721000;

2. 长沙理工大学 土木与环境工程学院, 湖南 长沙 410000;

3. 延安大学 建筑工程学院, 陕西 延安 710006)

摘要: 为探讨深埋输水管道圆形大直径沉井顶管施工关键技术及其对周围环境的影响, 对研和水厂分干线沉井下沉施工过程参数进行设计, 以4#工作井为研究对象, 建立沉井分节施工三维数值模型, 评估圆形大直径沉井顶管施工对周围环境变形的影响。研究表明: 沉井下沉过程中, 沉井和顶管施工引起地表最大沉降在可控范围内, 影响主要在0.333倍直径范围, 且增大沉井直径会引起地表沉降及其影响范围逐渐增大, 尤其是增大至1.2倍直径时, 影响范围扩大至0.611倍直径范围。

关键词: 深埋管道; 大直径圆形沉井; 施工技术; 变形; 数值模拟

中图分类号: TV698.11

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2025)05-0067-07

Analysis of Construction Technology and Deformation of Large-diameter Circular Caisson Pipe Jacking with Deep-buried Water Conveyance Pipelines

WU Tao¹, WEN Yingjie¹, JIANG Wangtao², WANG Jianwang³

(1. China Railway First Group Fifth Engineering Co., Ltd., Baoji, Shaanxi 721000, China;

2. School of Civil and Environmental Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha, Hunan 410000, China;

3. School of Civil Engineering, Yan'an University, Yan'an, Shaanxi 710006, China)

Abstract: The key technologies for the construction of large-diameter circular caissons for deep water transmission pipelines and its impact on the surrounding environment can be explored by designing the parameters of the sinking construction process and establishing the three-dimensional numerical model for the sectional construction of the caisson based on the No. 4 working well of the Yanhe Water Plantm, and the influence of the construction of large-diameter circular caissons on the deformation of the surrounding environment can be evaluated. The research results show that the maximum ground settlement caused by the caisson sinking and the top pipe construction is within the controllable range during the sinking process of the caisson, and the main impact is within 0.333 times the diameter range. Besides, the ground settlement and its influence range to gradually increase with increasing the diameter of the caisson. Especially when the diameter is increased to 1.2 times, the influence range expands to 0.611 times the diameter range.

Keywords: deep-buried pipeline; large-diameter circular caisson; construction technique; deformation; numerical simulation

随着城市化进程的加快, 供水设施的建设也越来越成为保障社会经济发展和人们生活质量的重要

基础设施之一。深埋输水管道作为一种重要的供水管网形式^[1], 通常需要穿越复杂的地质条件和密集

收稿日期: 2025-05-04

修稿日期: 2025-06-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(4240115)

作者简介: 武涛(1982—), 男, 高级工程师, 主要从事水利工程、铁路工程、市政工程、项目管理工作。E-mail: 41332182@qq.com

通讯作者: 蒋望涛(1994—), 男, 博士, 讲师, 主要从事隧道工程研究工作。E-mail: JTW940610@163.com

的地下空间,由于工程地质及水文地质条件复杂且深度较深,传统的施工方法如大开挖等已难以满足现代工程的需求。为了提高管道的施工效率与安全性,近年来,圆形沉井作为一种高效、安全的施工技术被广泛应用于深埋输水管道的建设中^[2-5]。然而,圆形大直径沉井施工技术面临着诸多挑战,如沉井下陷过程中的姿态控制、地层变形对周边环境的影响等。因此,深入研究深埋输水管道圆形大直径沉井施工技术及其变形影响,对于保障工程安全、提高施工效率以及减少对周边环境的干扰具有重要的理论和现实意义。

目前,国内外学者对沉井施工技术及其对周边环境的影响进行了广泛的研究,主要集中在沉井施工技术优化、地表沉降控制、土体相互作用分析、建筑物与地下设施风险评估以及环境保护措施等方面的研究。在国内,近年来研究也取得了一定的进展,例如,赵飞等^[6]提出了一种机械法开挖的沉井掘进机,通过截割滚筒和提压装置实现了高效、可控的沉井施工,显著提高了施工效率和安全性。卢海军等^[7]对软土地层中双洞口顶管接收井的下沉力学特性进行了研究,发现预设洞口会降低结构局部刚度,导致受弯效应增强,并加剧钢筋应力变化幅度。此外,邵文泽等^[8]对弱膨胀黏性土地段的大口径顶管工程中的沉井施工方案进行了比选与优化,深入探讨了沉井法和逆作法的优缺点,并提出了相应的优化设计建议。郑一苇^[9]则从沉井壁厚设计、顶力计算等方面,对市政工程顶管施工中的沉井结构优化设计展开研究,并强调了因地制宜的设计思路的重要性。陈西鹏^[10]聚焦于长距离污水管道顶管工程中的沉井施工关键技术,分析了沉井下陷过程中摩阻力以及顶管顶进过程中的顶推力等关键因素。国外在此领域的研究同样深入,Alonso^[11]发现于软土地基中会发生固结,从而改变其性状,因此有必要研究沉井在长期侧向荷载作用下的时间效应,开展了一项模型比例试验计划,研究沉井基础在侧向增量加载和持续加载共同作用下的情况。Peng 等^[12]研发了一种基于遥控技术的气动沉箱自动施工系统已在中国应用。它缩短了工期、减少了劳动力并降低了成本。垂直螺旋输送机减少了空气损失和噪音并提高了效率。然而,目前的研究多集中在中小直径或浅埋沉井,对于大直径和深埋沉井施工技术及其对周围地表沉降的影响研究仍显不足。特别是在复杂地质条件下,如何实现沉井下陷过程的精确控

制以及如何有效减少地表沉降,仍是亟待解决的问题。

基于此,以红塔干线研和水厂分干线 4# 工作井为工程背景,首先,考虑沉井埋深、直径和地质条件,设计得到沉井下陷系数、下沉安全稳定系数和抗浮系数,确定沉井施工方案;其次,利用 MIDAS GTS NX 软件建立三维数值模型,分析圆形大直径沉井顶管施工引起周围环境变形影响,结合现场监测结果验证所建立数值模型的合理性;最后,重点讨论沉井直径参数对沉井周围地表沉降的影响规律。研究成果可为深埋输水管道圆形大直径沉井顶管施工控制提供技术支撑。

1 工程概况

1.1 基本情况

云南省滇中引水二期配套工程玉溪施工段输水线路总长 247.481 km,属于向受水区进行水资源配置的供水干线工程,该工程下设易门干线(玉溪段)、澄江干线、红塔干线、江川干线、华宁干线、通海干线共六条干线,涉及三市十县。其中,红塔干线研和水厂分干线总长 7 961.711 m,其中里程 YH1 + 547.278—YH9 + 508.989 m 段为顶管段,沿线共布置 8 个工作井,以及 9 个接收井,工作井深度为 13.6 m~16.3 m,采用内径 11 m~13 m、外径 12.6 m~14.6 m 的圆形井,接收井深度为 14.1 m~17.4 m,采用内径 8 m~13 m、外径 10.4 m~15.8 m 的圆形井,采用现浇沉井方式施工,可视为大直径深埋沉井。沉井相关信息及地质环境如表 1 所示。

根据场地地质勘察资料显示,沉井施工深度范围内主要分布有碎石填土、粉质黏土、砾砂、圆砾、粉砂等,沉井施工深度范围地下水位埋深 2.00 m~8.80 m,地层条件良好,土层物理力学参数如表 2 所示。

1.2 工程特点

基于前述基本情况,可以看出云南省滇中引水二期配套工程玉溪施工段输水线路长度较大,工程地质情况较复杂,沉井施工过程工程特点及难点明显,具体如下:

(1) 沉井分布相对较为分散,相对距离较远,对施工组织要求较高。

(2) 红塔干线研和水厂分干线管道一段沉井部分位于现状道路上,沉井施工期间对地面的沉降、周边构筑物 and 地下管线的变形开裂控制要求较高。

表1 沉井相关信息与地质环境

序号	沉井编号	沉井高度/m	净直径/m	工程地质情况	地下水埋深/m
1	1#接收井	15.0	9.00	人工填土、砂砾石	3.2
2	1#工作井	14.1	11.00	人工填土、砂砾石	3.2
3	2#接收井	14.4	8.00	人工填土、砂砾石	3.0
4	2#工作井	15.3	11.00	人工填土、砂砾石、砾石夹砂卵石	3.0
5	3#接收井	16.4	8.00	人工填土、砂砾石、粉质黏土、砾石夹砂卵石	3.0
6	3#工作井	13.6	11.00	人工填土、砂砾石、粉质黏土、砂砾石	2.7
7	4#接收井	16.4	8.00	人工填土、砂砾石	3.7
8	4#工作井	16.9	13.00	人工填土、砂砾石	4.0
9	5#接收井	15.3	11.00	人工填土、砂砾石、粉质黏土、砾石夹砂卵石	3.0
10	5#工作井	17.4	8.00	人工填土、砂砾石、粉质黏土、砾石夹砂卵石	2.8
11	6#接收井	16.3	13.00	人工填土、粉质黏土、砾石夹砂卵石	4.8
12	6#工作井	15.7	11.00	人工填土、粉质黏土、砾石夹砂卵石	4.8
13	7#接收井	14.8	8.00	人工填土、粉质黏土、砾石夹砂卵石、粉质黏土	5.8
14	7#工作井	15.5	13.00	人工填土、粉质黏土、砾石夹砂卵石、粉质黏土	6.8
15	8#接收井	15.1	11.00	人工填土、粉质黏土、砾石夹砂卵石	7.1
16	8#工作井	15.7	8.00	人工填土、粉质黏土、砾石夹砂卵石	6.8
17	9#接收井	15.1	13.00	人工填土、粉质黏土、砂砾石、砾石夹砂卵石	6.8

表2 土层物理力学参数

序号	土层	重度 γ /($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	平均厚度/m	内摩擦角 φ /($^\circ$)	黏聚力 c /kPa	压缩模量 E_s /MPa	单位面积土的侧阻力/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$)	沉井外壁与土层摩擦阻力/kPa	渗透系数/($\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$)
1	填土	18.0	3.64	10.0	12.0	3.0	500	0.1~0.2	0.5
2	粉质黏土	19.0	4.50	33.4	15.0	9.5	1000	23	0.1
3	砾砂	19.5	5.03	28.0	25.0	11.5	7000	18	24.5
4	圆砾	20.0	5.74	30.0	28.0	8.5	7000	19	53.4
5	粉砂	19.5	2.07	23.0	0.0	10.0	40	17	2.7

(3) 沉井所在地层情况复杂,地质变化较大,地层极不均匀,容易造成沉井偏斜,出现孤石时易造成无法下沉的现象,控制沉井下沉垂直度和正常下沉是难点。

(4) 红塔干线研和水厂分干线4#接收井沉井在河道边,地下水非常丰富,地层主要为松散地层,沉井下沉周边坍塌风险较高。

2 沉井施工技术

2.1 沉井下沉参数设计

由于该区段顶管沉井均位于市区道路旁,施工场地受限,不能进行放坡开挖,且顶管井深度集中在14 m~17 m以上,属于深井。此外,顶管段沿线坡度缓,工程地质情况单一,地下水位无突变,均考虑沉井法施工。为此,对研和水厂分干线接收井和工作井进行设计,重点关注沉降下沉系数、下沉稳定性、抗浮性等参数设计,为后续数值分析提供支撑。

(1) 沉井下沉系数计算

沉井下沉过程中,其下沉系数计算式为:

$$k_{st} = \frac{G_{ik} - F_{fw,k}}{F_{fk}} \quad (1)$$

式中: k_{st} 为下沉系数,且 $k_{st} \geq 1.05$; G_{ik} 为沉井自重, kN ; $F_{fw,k}$ 为下沉过程中水的浮托力标准值, kN ; F_{fk} 为井壁总摩擦阻力标准值, kN 。

(2) 沉井下沉稳定性计算

沉井下沉过程中,其下沉稳定系数计算式为:

$$k_{st,s} = \frac{G_{ik} - F'_{fw,k}}{F'_{fw} + R_b} \quad (2)$$

式中: $k_{st,s}$ 为下沉稳定系数,且 $k_{st,s} = 0.8 \sim 0.9$; $F'_{fw,k}$ 为验算状态下水的付托力标准值, kN ; F'_{fw} 为验算状态下井壁总摩擦阻力标准值, kN ; R_b 为沉井刃脚、隔墙和梁底下地基土的极限承载力之和, kN 。

(3) 沉井下沉抗浮计算

沉井下沉过程中,其抗浮计算按封底和使用2个阶段进行,分别根据可能出现的最高水位进行验算,具体计算式为:

$$k_{fw} = \frac{G_{ik}}{F_{fw,k}^b} \quad (3)$$

式中: k_{fw} 为抗浮系数,且 $k_{fw} \geq 1.0$; $F_{fw,k}^b$ 为基底的水浮托力标准值, kN。

基于前述工程特性及土层力学参数,计算得到红塔干线研和水厂分干线工作井与接收井设计参数,如表 3 所示。

表 3 顶管井沉井主要设计计算结果

设计参数	下沉系数	下沉稳定系数	抗浮系数(封底)		抗浮系数(使用)	
			不计摩阻力	计入摩阻力	不计摩阻力	计入摩阻力
允许值	1.05	0.80~0.90	1.00	1.15	1.00	1.15
1#接收井	1.23	0.89	1.30	2.40	3.03	3.93
1#工作井	1.35	0.85	1.26	2.08	2.96	3.65
2#接收井	1.66	0.89	1.34	2.50	2.54	3.48
2#工作井	1.36	0.83	1.28	2.10	2.86	3.52
3#接收井	1.26	0.87	1.29	2.42	2.45	3.40
3#工作井	1.34	0.82	1.20	2.00	2.71	3.39
4#接收井	1.54	0.85	1.74	3.23	3.21	4.35
4#工作井	1.41	0.87	1.14	1.84	2.06	2.68
5#接收井	1.46	0.84	1.52	3.23	2.89	4.05
5#工作井	1.53	0.86	1.57	2.96	3.06	3.68
6#接收井	1.48	0.82	1.68	3.13	3.38	4.41
6#工作井	1.57	0.85	1.73	2.84	3.92	4.81
7#接收井	1.33	0.84	2.31	4.33	3.59	4.95
7#工作井	1.40	0.83	2.36	4.40	5.03	6.03
8#接收井	1.54	0.86	2.12	3.44	4.83	5.85
8#工作井	1.60	0.83	2.86	5.29	3.99	7.39
9#接收井	1.44	0.88	1.88	2.99	2.55	4.39

基于表 3,从 17 个沉井下设计参数可以看出:①下沉系数均大于最小控制值 1.05,表明在碎石填土、粉质黏土、砾砂、圆砾、粉砂等地层条件下,红塔干线研和水厂分干线圆形大直径沉井能顺利下沉,且下沉系数有较大富余量。②下沉稳定系数均处于 0.80~0.90 之间,表明在碎石填土、粉质黏土、砾砂、圆砾、粉砂等地层条件下,红塔干线研和水厂分干线圆形大直径沉井下过程,其结构变形稳定。③当不计入摩阻力时,17 个沉井下过程中,不论是封底阶段还是使用阶段,沉井的抗浮系数均大于规定最小限定值 1.0,最高抗浮系数为 5.03,使用阶段抗浮系数明显大于封底阶段,这是因为使用过程中,考虑输水管道与沉井中水的重量所致。同时,当计入摩阻力时,17 个沉井的抗浮系数均大于规定最小限定值 1.0,最高抗浮系数为 7.39。考虑摩阻力时的抗浮系数明显大于不计摩阻力的情况,这表明沉井侧壁与周围岩土体的摩阻力不容忽视。

从上述分析看出,红塔干线研和水厂分干线 17 个沉降设计参数均符合设计规范,这意味着在此复杂地质与环境下,采用沉井施工能有利于深埋圆形大直径沉井施工安全。

2.2 沉井施工

为选择合适沉降方案,对比现浇沉井和预制沉井方案,如表 4 所示。综合对比施工组织、施工工艺、工期、成本以及优缺点等方面,确定选用现浇沉井方案对红塔干线研和水厂分干线进行沉井施工。

表 4 沉井施工方案对比

方案名称	施工组织	施工工艺	工装设备	工期	成本	施工安全	优点	缺点
现浇沉井	较为简单	成熟	25 t 汽车吊、拼装钢模板	75 天/个	800 元/m ³	可控	无需大型吊装设备辅助,施工较为简单	工序时间相对较长,施工质量不易控制
预制沉井	较为复杂	成熟	300 t 汽车吊、平板运输车、定性钢模板	50 天/个	1200 元/m ³	可控	施工工期相对可以缩短,施工质量有保障	需大型吊装和运输设备辅助,额外增加预制场地

根据沉井方案比选及顶管管道的特性,沉井采用就地现浇分节下沉,首节井壁制作高度 6 m,后续每节制作高度不超过 8 m(标准节高 6 m),沉井高度见表 1,具体各节沉井井壁制作高度如图 1 所示。

红塔干线研和水厂分干线 17 个沉井施工步骤如下:①场地平整后进行局部硬化处理;②首节井壁高度不小于刃脚高度,不超过 6 m;③在井壁混

凝土达到设计要求强度后,首先用水泵排干井里的水,然后人工配合挖土机开挖土方,井跟着下沉;④首节井壁下沉注意纠偏,确保垂直度,在沉井壁上设 4 个观测点,每天定时测量;⑤后续每节井壁高度 2 m~6 m(标准节高 6 m);⑥井壁下沉完成后,清理基底,按照设计要求施工垫层和钢筋混凝土底板。

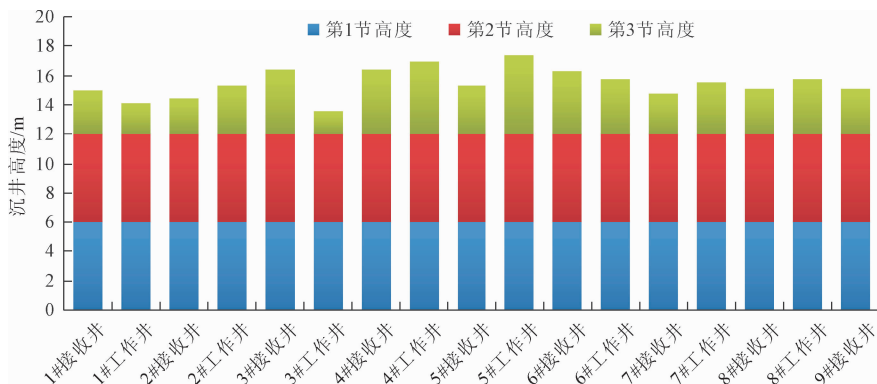


图 1 沉井各节下沉制作高度统计

3 沉井顶管施工变形影响分析

3.1 典型沉井顶管施工概况

综合考虑地质条件、沉井深度、沉井直径等因素,以 4#工作井为典型沉井,该沉井内径 13.0 m,外径 15.0 m,井深 16.9 m,井底厚度 1.5 m,刃脚高度 2.9 m,顶管外径 3.55 m,采用 DN3000 钢筋混凝土管,壁厚 275 mm,井底采用 C20 混凝土封底,其余混凝土等级 C30,地下水位 4.0 m,顶管埋深 12.0 m。由于沉井缺乏支撑系统,在下沉过程中,其变形稳定性是施工过程所必须要关注的问题,尤其是地表沉降,因此,在沉井周围两侧按照 2 m 间距布置了 5 个沉降监测点,具体 4#工作井与周围环境尺寸关系如图 2 所示。

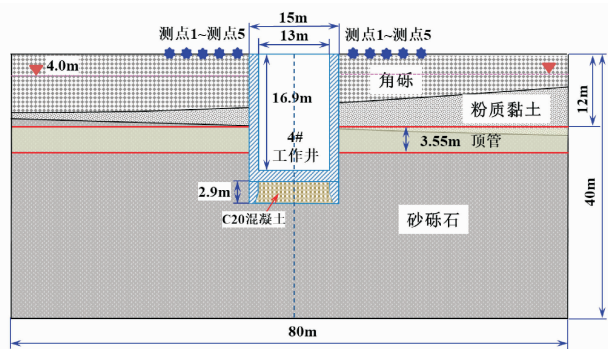


图 2 4#工作井尺寸关系图

3.2 模型建立

采用 MIDAS GTS NX 岩土工程软件模拟研和水厂分干线 4#工作井下沉施工过程,模型尺寸是 80 m × 80 m × 40 m (X × Y × Z),采用修正摩尔-库仑本构模型(MMC)进行模拟,土层分布与实际不均匀地层一致,土体采用四面体实体单元结构形式,数值模型如图 3 所示。模型底部采用固定约束,侧面采用固定法向的位移约束,顶部为自由面。

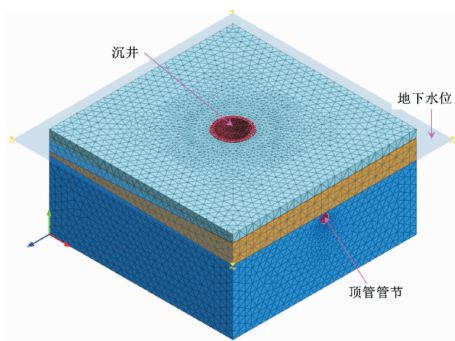


图 3 4#工作井与顶管数值模型图

所建立 3D 模型共划分 151 047 个单元,26 211 个节点,通过设置岩土体间强度折减系数 0.7 的界面单元模拟沉井侧壁和周围岩土体的耦合作用,沉井施工过程采用 3 节下沉,顶管一次性顶进通过,采用先井后洞施工方式,地下水位设置 -4.0 m,沉井结构及混凝土材料参数如表 5 所示。

表 5 混凝土材料参数

名称	单元类型	重度 γ / (kN · m ⁻³)	弹性模量 E/GPa	泊松比 μ	厚度 /m
沉井侧壁	Shell 单元	25	30.0	0.20	1.000
沉井底板	Shell 单元	25	30.0	0.25	1.500
沉井封底	Shell 单元	25	25.0	0.25	2.900
顶管管节	Shell 单元	25	40.0	0.25	0.275

3.3 计算结果分析

3.3.1 地表沉降

考虑沉井分节下沉与顶管顶进施工过程,提取第 3 节沉井施工与顶管顶进后的地表沉降云图,如图 4 所示。从图 4 可以看出,在沉井下沉完毕时,地表周围土层呈现较好的圆形变化规律,最大沉降为 -5.55 mm,当顶管顶进后,沉降变形发生较大范围变化,最大沉降为 -5.09 mm,均发生在沉井周围,

顶管顶进过程中考虑顶进推力影响,致使沉井周围沉降稍有回弹趋势,且顶管顶进管道上方沉降明显增大,尽管沉井与顶管施工对地表沉井有影响,但沉降风险在规范允许范围内。

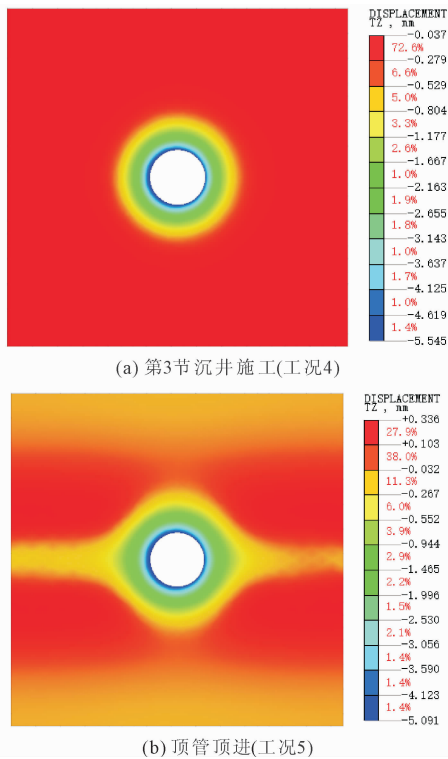


图4 地表沉降计算云图

沉降影响明显大于顶管施工过程,这是沉井直径远大于顶管直径所致。

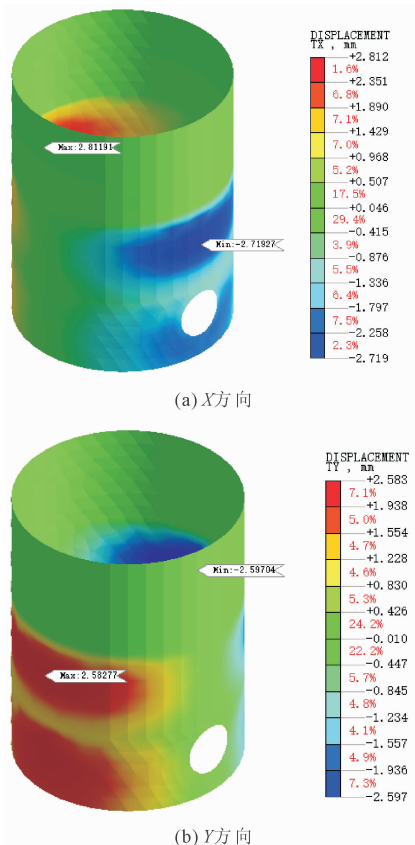


图5 沉井水平变形计算云图

3.3.2 沉井变形

考虑沉井分节下沉与顶管顶进施工过程,提取第3节顶管顶进后(工况4)的沉井水平变形云图,如图5所示。从图5可以看出,沉井水平X方向和Y方向上最大变形均发生在第2节沉井和第3节沉井位置,最大X方向水平变形为-2.72 mm和2.81 mm,最大Y方向水平变形为-2.60 mm和2.58 mm,这意味着沉井与顶管施工期间,沉井结构变形稳定,在规范允许范围内。

3.3.3 结果对比

以沿着顶管走向方向为对象,对比沉井、顶管施工数值计算与现场施工结果,如图6所示。数值计算结果与现场监测结果变化趋势基本一致,数值计算结果最大沉降为-4.11 mm,发生于第三次沉井施工工序(工况4),略小于现场结果-4.35 mm,均发生在沉井周围附近。此外,在相同横向距离,现场监测结果大于数值计算结果,这是因为数值计算结果属于理想化状态模型,而现场施工过程存在众多不可控因素,增大地表沉降。沉井施工过程对地表

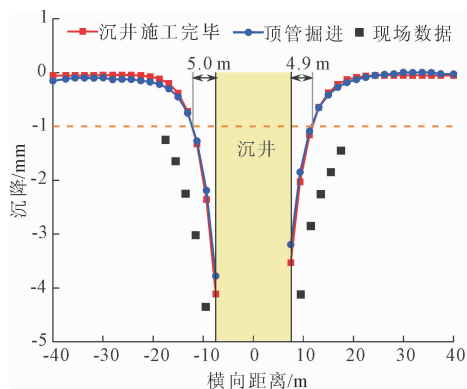


图6 地表沉降对比结果

依据《城市轨道交通工程测量规范》(GB/T 50308—2017),当地表沉降不超过1 mm时,可认为该点未受到沉井与顶管施工影响,因此,假定沉降值1 mm对应的变形长度范围为 W ,以 W/D (D 为顶管直径)表示周围环境地表沉降受沉井的影响程度,图6表明该工程沉井施工影响范围在 $0.33D$ 左右。上述结果表明,所建立的数值模型模拟深埋圆形大直径沉井施工引起周围环境变形的分析合理可靠,

能为日后类似地质环境沉井工程施工提供理论技术指导。

3.4 直径影响分析

红塔干线研和水厂分干线沉井属于大直径沉井,直径尺寸对工程稳定性影响极大,为此,重点讨论沉井直径对周围环境变形的影响。保持其他参数不变,拟定直径参数 D 为 $0.8D_0$ 、 $0.9D_0$ 、 $1.0D_0$ 、 $1.1D_0$ 、 $1.2D_0$,建立相应数值模型,计算得到沉井施工过程对周围环境的影响结果,如图7所示。

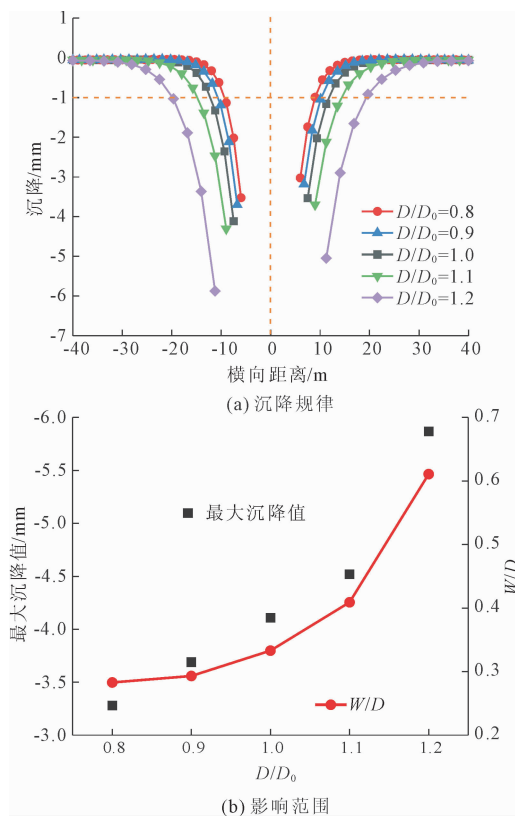


图7 直径影响下周围环境沉降变化规律

可以看出,不同直径条件下,沉井施工对周围环境沉降的变化规律一致,沿着沉井往外向延伸,地表沉降不断减少,当 D/D_0 分别取 0.8、0.9、1.0、1.1 和 1.2 时,地表最大沉降分别是 -3.28 mm、 -3.69 mm、 -4.10 mm、 -4.52 mm 和 -5.87 mm,当沉井直径缩小时,地表沉降以线性速率变化,当沉井直径增大到 $1.2D_0$ 时,地表沉降变化速度明显增大,沉井施工影响范围也逐渐增大, W/D 由 0.283 变化至 0.293、0.333、0.409 和 0.611,这充分说明增大沉井直径到一定值时地表沉降会显著增加,也意味着大直径沉井施工显然会造成对周围环境的变形影响。

4 结论

以红塔干线研和水厂分干线为工程背景,分析了深埋输水管道圆形大直径沉井顶管施工技术及变形影响分析,主要结论如下:

(1) 考虑红塔干线研和水厂分干线地质和周围环境特性,共设计 17 个沉井,综合考虑沉井埋深、直径和地质条件,计算得到沉井下陷系数、下沉安全稳定系数和抗浮系数,计算结果均符合设计规范要求,沉井施工安全可行。

(2) 采用现浇沉管分节下沉施工,建立数值模型模拟 4# 工作井典型区段沉井下陷过程,沉井和顶管施工引起地表最大沉降分别是 -5.55 mm 和 -5.09 mm,沉井井壁水平变形小于 3 mm,这意味着沉井下陷施工过程中沉井结构和周围环境变形可控。

(3) 数值计算结果与现场数据结构具有相似变化规律,沉井施工影响范围主要在 $0.333D$ 内,当沉井直径逐渐增大时,地表沉降及其影响范围逐渐增大,当沉井直径扩大至 1.2 倍时,沉井施工对环境影响显著增大,这说明在实际施工过程中,沉井工程设计时,需要重点考虑沉井直径因素影响。

参考文献:

- [1] 王如华,王健,李永明,等. 大口径深埋输水管道功能井的紧凑布置研究与设计[J]. 给水排水, 2009, 45(10): 53-55.
- [2] 张磊,罗英,尹东亚,等. 常泰长江大桥主塔沉井出坞浮运施工关键技术[J]. 施工技术(中英文), 2022, 51(10): 92-96.
- [3] 徐海宁,彭夏军,马龙飞. 复杂条件下超深双沉井施工关键技术[J]. 施工技术(中英文), 2022, 51(7): 122-127.
- [4] 徐杰,刘修成,管政霖. 大型桥梁沉井不排水下沉取土设备研究与实践[J]. 施工技术(中英文), 2022, 51(5): 70-74.
- [5] 罗实瀚,徐伟. 地锚式沉井压入施工阶段对环境的影响监测成果分析[J]. 建筑结构, 2016, 46(8): 100-105.
- [6] 赵飞,徐光亿,吕旦. 沉井掘进机关键技术研究及试验[J]. 隧道建设(中英文), 2023, 43(S2): 578.
- [7] 卢海军,崔旭辉,陈春林,等. 软土地层双洞口顶管接收井下沉力学特性研究[J]. 建筑结构, 2024, 54(9): 102-107.
- [8] 邵文泽,巩宁. 弱膨胀黏性土地段大口径顶管工作井施工方案比选及优化[J]. 公路, 2020, 65(6): 202-205.

(4) 在确定的合龙方案下,考虑支座预偏时,对于预应力效应,应考虑其全部效应;对于收缩和徐变效应,对两者可统一取5年的发展时间;对于温度效应,则需根据施工进度安排和历史气温资料预测各跨的合龙温度,从而得到预估的支座偏移量。

参考文献:

- [1] 华惠敏. 钱塘江二桥多跨长联铁路连续梁设计[J]. 桥梁建设,1992(3):1-9.
- [2] 肖星星. 年温差对多跨长联桥的影响分析[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),2008,31(4):639-644.
- [3] 杨秀荣,李猛,姚丝思. 一次性合龙的长联多跨连续刚构桥梁支座预偏量计算分析[J]. 城市道桥与防洪,2016(3):112-113.
- [4] 龚忠辉,李小云. 拉萨河特大桥新型支座安装技术[J]. 桥梁建设,2005,35(5):46-48.
- [5] 刘世忠,杨延超,潘存尚,等. 15跨一联 PC 连续梁桥支座纵向预偏量设置研究[J]. 桥梁建设,2020,50(3):32-38.
- [6] 张欣欣,马坤全,张骏. 长联多跨客运专线连续梁桥支座预偏量的研究[J]. 城市轨道交通研究,2010,13(10):42-47.
- [7] 潘存尚. 海子湖十五跨一联 PC 连续箱梁桥悬臂施工关键技术研究[D]. 兰州:兰州交通大学,2019.
- [8] 张立江. 王岗至万乐联络线松花江大桥主桥设计[J]. 桥梁建设,2006,36(2):32-35.
- [9] 程业,潘旦光,吴勇,等. 混凝土箱梁支座位移实验及有效温度计算[J]. 工程力学,2017,34(9):220-229.
- [10] 彭大文,陈朝慰,林志平,等. 混凝土 T 梁的温度-位

移测试及计算研究[J]. 福州大学学报(自然科学版),2007,35(2):270-275.

- [11] 邓扬,李爱群,丁幼亮. 大跨悬索桥梁端位移与温度的相关性研究及其应用[J]. 公路交通科技,2009,26(5):54-58.
- [12] 夏樟华,朱三凡,宗周红. 基于健康监测的大跨度连续刚构桥支座位移评估[C]//崔京浩. 第18届全国结构工程学术会议. 广州,2009:542-548.
- [13] 周云,危俊杰,李剑,等. 基于 InSAR 技术的大跨桥梁温度变形监测研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2024,51(3):39-50.
- [14] 欧阳柳,王少华,李冰,等. 摩擦摆支座滑动位移量选取研究[J]. 机械设计与制造,2018(5):89-92.
- [15] Palazzo B, Castaldo P, Vecchia P D. Seismic reliability analysis of base-isolated structures with friction pendulum system [C]//2014 IEEE Workshop on Environmental, Energy, and Structural Monitoring Systems Proceedings. Naples, 2014:1-6.
- [16] 张永亮,刘聪聪,李晓钟,王春阳. 长联连续梁桥双曲面球型减隔震支座参数影响研究[J]. 桥梁建设,2022,52(1):94-100.
- [17] 丁世跃,刘世忠,潘存尚,等. 摩擦摆支座对复杂多跨长联 PC 连续梁桥支座预偏量的影响[J]. 江西建材,2020(4):14-16.
- [18] 裴昊. 大跨长联 PC 梁式桥结构体系及温度效应研究[D]. 郑州:郑州大学,2023.
- [19] 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范: JTG 3362—2018 [S]. 北京:人民交通出版社,2018.
- [20] CEB-FIP Model Code 1990: design code[S]. London: Thomas Telford Services Ltd, 1993.

(上接第73页)

- [9] 郑一苇. 市政工程顶管施工中的沉井结构优化设计[J]. 市政交通水利工程设计,2022(7):87-89.
- [10] 陈西鹏. 长距离污水管道顶管工程中的沉井施工关键技术研究[J]. 工程施工技术,2024(16):209-211.
- [11] Alonso E E, Pinyol N P, Fernández P. Caisson Failure Induced by Wave Action [M]//Developments in

Geotechnical Engineering. Springer India, 2015:45-93.

- [12] Peng Fangle, Dong Yunhao, Wang Hailin, et al. Remote-control technology performance for excavation with pneumatic caisson in soft Ground [J]. Automation in Construction, 2019,105:102834.