

软土地区引水沉井沉降预测

林小飞, 马泉坤*, 刘越, 吴慧明

(浙江开天工程技术有限公司, 浙江 宁波 315000)

摘要: 软土地区用于穿管用的沉井回填期间及回填后的沉降直接关系到引水管线安全, 但现有计算理论很难对沉井沉降进行可靠预测, 尤其是软土地区采取了各种减沉措施的沉井沉降。本文选取宁波软土地区一重大引水工程, 对2个采取减沉措施的工作沉井和2个未采取减沉措施接收沉井进行了沉降变形长期跟踪监测, 监测结果表明: 该区域沉井下沉性状与沉井参数关系较小; 沉井沉降主要发生在沉井回填施工期间, 回填完成后10d内沉降基本稳定; 对4个沉井的沉降监测数据进行分析统计, 通过多个回归模型对比后发现, 双曲线模型预测法具有较好适配性, 预测曲线与实测沉降曲线良好吻合, 可用作引水全线沉井沉降的预测, 为该区域引水管线的安全提供可靠的技术支持。

关键词: 沉井回填; 沉降规律; 工后沉降预测; 双曲线法; 实测曲线

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2024)03-0305-07

Settlement prediction of water diversion open caisson in soft soil area

LIN Xiao-fei, MA Quan-kun*, LIU Yue, WU Hui-ming

(Kaitian Engineering Technology Co., Ltd., Ningbo 315000, Zhejiang, China)

Abstract: The settlement of open caisson in soft soil regions significantly impacts the safety of water diversion pipelines. However, existing calculation theories are difficult to accurately predict open caisson settlement, particularly in soft soil areas implementing various settlement reduction measures. This work focuses on a significant water diversion project situated in the soft soil area of Ningbo. Long-term tracking monitoring was conducted on the settlement deformation of two working open caissons and two receiving open caissons. Monitoring results reveal that the sinking behavior of open caissons exhibits minimal correlation with caisson parameters within this locale. Settlement predominantly occurs during the construction stage of open caisson backfilling, and approaches stable within 10 d after backfilling completion. Analysis of settlement monitoring data from the four open caissons were performed. Through comparative assessment of multiple regression models, the hyperbolic model prediction method exhibits strong adaptability. Notably, the prediction curve closely aligns with the measured settlement curve, offering a reliable way to forecast open caisson settlement. This predictive capability furnishes valuable technical support for pipeline safety within this area.

Key words: open caisson backfilling; settlement development; post construction settlement prediction; hyperbolic model method; measured curve

0 引言

沉井因占地面积小、内部空间大、易于穿管, 被广泛应用于引水工程中^[1-2]。沉井下沉施工是挖土卸荷过程, 后期回填是填土加荷过程。对于下卧软土层, 当沉井施工回填时, 土层首先产生再压缩变

形, 当基底压力大于开挖前土体自重应力时, 基底将会由于附加应力产生压缩变形^[3], 下卧土层压缩变形导致位于软土地基中的管线沉降与沉井沉降出现沉降差, 极易引发穿管管道拉裂。所以, 为确保引水管线安全, 对沉井工程施工后沉降的预测和控制显得尤为重要。然而, 引水穿管沉井施工较为

收稿日期: 2022-12-15

基金项目: 宁波市水利科技计划项目(NSKA202106); 宁波市交通运输科技计划项目(NO.202106); 宁波市科技计划项目(2019B10047)。

作者简介: 林小飞(1975—), 男, 浙江宁波人, 本科, 高级工程师, 主要从事岩土工程领域的科研与生产工作。E-mail: 402550617@qq.com。

*通信作者: 马泉坤(1993—), 男, 河南新乡人, 硕士, 中级工程师, 主要从事岩土工程领域的科研与生产工作。E-mail: 1085622705@qq.com。

复杂且工期较长,施工工序包括挖土、下沉、封底、回填等,每个施工步骤存在较多的不确定因素,导致通过土工参数取值建立的沉井最终沉降理论难以对沉井沉降进行可靠的计算与预测,尤其软土地区,为控制沉井沉降还常常采取一些减沉控制措施,使得沉井的沉降计算与预测更为复杂。且国内外对于回填期及工后沉井沉降研究明显不足,现有预测模型^[4-6]仍没有应用到沉井的工后沉降预测这一方面,主要集中于沉井开挖期的下沉、端阻力及侧壁阻力等方向^[7-11],而工后沉井沉降的控制是管道破坏与否的关键因素。

其次,在回填施工过程中,回填次数是工程工期控制的重要参数,多次回填将导致工程工期大幅延长,影响工程经济效益,然而,软土地区一次性回填是否影响沉井沉降量尚不清晰,一次性回填过多是否会导致管道拉裂?回填后在什么时间需要对管道沉井之间进行应力监测?以上问题的存在严重影响了沉井回填期管道的安全。

因此,需对沉井回填期间的软土沉降性状及工

后沉降进行研究,确保引水工程管道安全运行。本文通过对软土地区多个沉井进行长期沉降监测,研究沉井回填过程中的沉降性状,结合地区已有经验,选取良好适配性模型,预测沉井工作性状与沉降性状,推算沉井最终沉降量^[12-14],建立该地区可靠的沉井工后沉降预测模型,为软土地区引水管线的安全提供可靠的技术支持。

1 工程概况

1.1 工程地质概况

宁波至杭州湾新区引水工程输水主线长69.1 km,工程等别为III等,主要建筑物级别为3级,次要建筑物级别为4级。工程总投资23.07亿元。引水管线采用顶管施工方式,管道埋深5~22 m,根据勘察资料,项目所在区域土层力学参数见表1,其中 q_s 为沉井外壁与土体间的单位摩阻力。地质剖面示意图见图1。

表1 土层力学参数

Table 1 Soil mechanical parameters

| 地层编号 | 土层类别 | w/% | $\gamma/(\text{kN}/\text{m}^3)$ | e | I_L | I_P | $\varphi_c/(\text{°})$ | c_c/kPa | $E_{s0.1-0.2}/\text{MPa}$ | q_s/kPa |
|----------------|---------|------|---------------------------------|------|-------|-------|------------------------|------------------|---------------------------|------------------|
| ① ₂ | 粉质黏土 | 29.7 | 19.1 | 0.85 | 0.75 | 12.9 | 14.6 | 16.8 | 5.60 | 15 |
| ② ₂ | 粉土 | 26.9 | 18.8 | 0.77 | 0.70 | 9.0 | 24.6 | 10.7 | 10.70 | 25 |
| ③ ₁ | 淤泥质粉质黏土 | 41.1 | 17.9 | 1.16 | 1.20 | 16.2 | 11.7 | 10.7 | 2.66 | 12 |
| ④ ₁ | 淤泥质黏土 | 41.5 | 17.8 | 1.17 | 1.20 | 17.0 | 8.7 | 11.2 | 2.41 | 12 |
| ④ ₂ | 粉质黏土 | 31.5 | 19.9 | 0.96 | 0.89 | 14.3 | 12.0 | 18.8 | 3.53 | 16 |
| ④ ₃ | 粉土 | 26.2 | 19.1 | 0.78 | 0.65 | 8.3 | 24.6 | 10.7 | 10.28 | 25 |

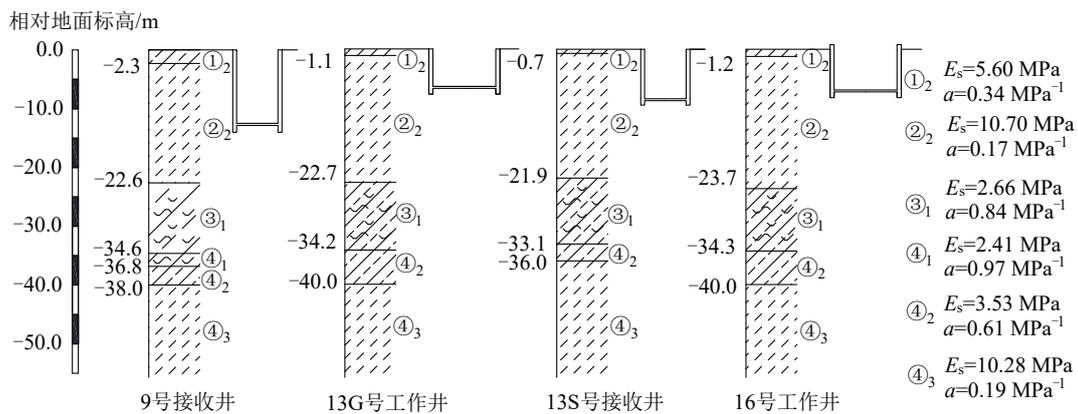


图1 地质剖面示意图

Fig. 1 Schematic diagram of geological profile

1.2 沉井概况

为预测软土地区沉井工后沉降性状,分别选取该引水工程4个典型沉井进行长期沉降监测,其中2个为顶管工作井、2个为顶管接收井,沉井结构示

意图如图2所示。2个工作井开挖下沉前外侧土体均采用双排水泥搅拌桩加固,搅拌桩与沉井外壁间距1 m,顶管洞口与双排桩之间采用水泥搅拌桩局部加固;刃脚底部采用高压旋喷桩加固,采用C30

混凝土封底。2个接收井仅在顶管洞口处采用双排双轴水泥搅拌桩加固, 底部采用C20混凝土封底。

4个沉井的施工参数如表2所示, 同一类型沉井直径相同, 长度不同。

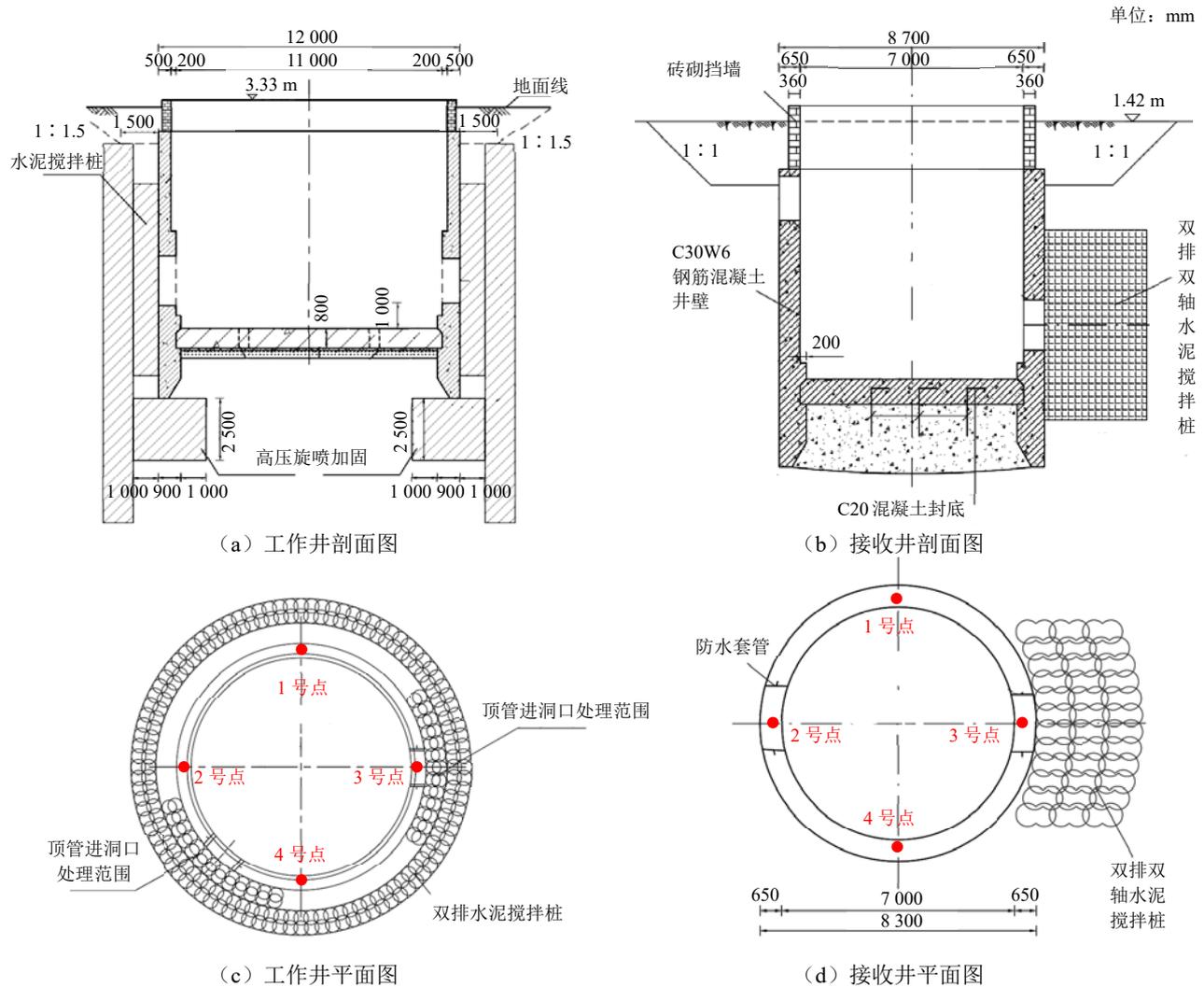


图2 沉井结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of open caisson structure

表2 沉井施工参数表

Table 2 Construction parameters of open caisson

| 井号 | 外径/m | 内径/m | 井壁长/m | 回填深度/m |
|---------|------|------|-------|--------|
| 9号接收井 | 8.3 | 7.0 | 14.00 | 12.50 |
| 13G号工作井 | 12.0 | 10.6 | 7.66 | 6.36 |
| 13S号接收井 | 8.3 | 7.0 | 9.50 | 8.40 |
| 16号工作井 | 12.0 | 10.6 | 9.00 | 6.90 |

1.3 施工工序及监测位置

4个沉井均采用挖机将周围的原土回填至沉井内, 回填高度基本与地面持平。沉井整体工期内施工步骤依次为: 开挖下沉、封底、顶管、第一次回填、等待沉井下沉、第二次回填。沉降监测仪器采用数字水准仪, 监测位置位于沉井顶部, 4个沉降监测点呈对称分布, 见图2中的1~4号点。

2 沉降监测结果分析

对13G号、16号工作井, 9号、13S号接收井进行施工回填期及回填后的沉降监测。

2.1 沉井回填高度及沉降量关系曲线分析

沉井采用分层回填, 回填高度及沉降量关系见图3。由图3可知, 沉井沉降量随着时间逐渐增加, 回填当天沉降量最大, 且沉降速率逐渐降低。回填后, 2d内沉井各点沉降量较大, 但直到下次回填之前, 曲线趋于稳定。接收井9号井与13S号井施工期结束平均累计沉降量分别为9.71mm与15.95mm, 工作井13G号井与16号井施工期结束平均累计沉降量分别为12.89mm与15.59mm, 16号井1号点及4号点数据差异主要是由于回填施工中沉井倾斜所致。

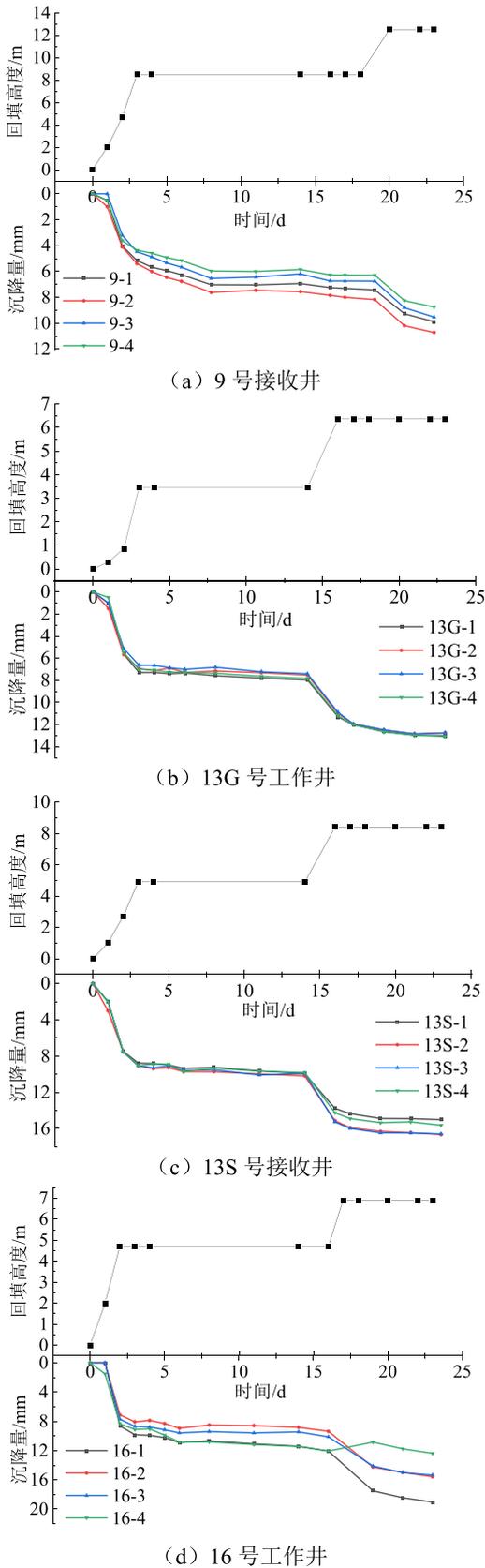


图3 回填高度及沉降量关系

Fig. 3 Relationship between backfilling height and settlement

通过对比4个沉井的半径及沉降数据发现,通过施工控制后的沉井工后沉降与半径同样无明显关系。主要由于在土质较好的粉土层,搅拌桩的施

工决定了沉井的工后沉降,沉井回填期沉降易控制,且控制效果与沉井回填高度关系不大。

2.2 回填期沉井沉降分析

将回填结束1d后至下次回填前记为回填等待期,回填及回填结束后1d记为回填期,回填不同阶段沉降量见图4,两次回填期单位回填高度的沉降量见图5。

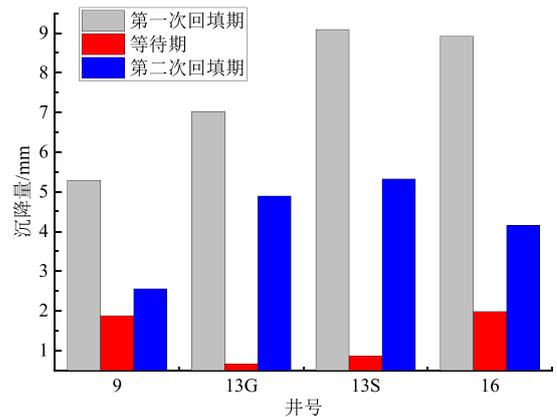


图4 回填不同阶段沉降量

Fig. 4 Settlement at different stages of backfilling

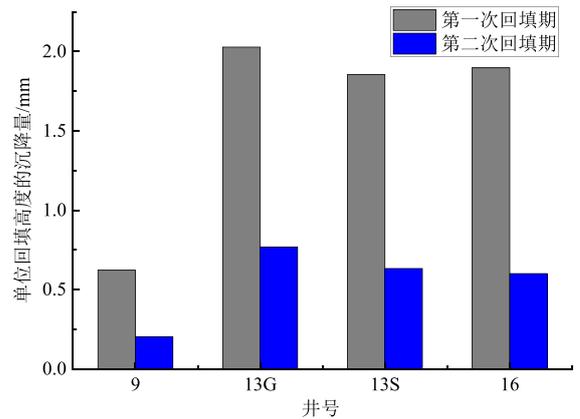


图5 单位回填高度的沉降量

Fig. 5 Settlement of unit backfilling height

通过图4可以看出,施工期沉降主要位于第一次回填期。第一阶段沉降占整个施工期沉降量的54.5%~57.2%;施工等待期沉降占整个施工期沉降量的5.1%~19.3%,此阶段土体为恒定荷载下的排水固结过程,取决于沉井下部土体排水特性,短时间内沉降不大;第二阶段沉降占整个施工期沉降量的26.3%~37.9%。

由图5可以看出,第一次回填期单位回填高度下沉量约为第二次回填期的3倍,第一阶段压密后,再次施加荷载,土体变形相对第一次沉井回填过程明显减小。

由图4与图5中数据可以得到,根据现有的施工回填条件,施工期下沉量主要处于第一次回填

期, 沉井回填施工时, 应注意该阶段沉井井壁与管道之间是否产生大应力挤压, 减小后期管道拉裂风险。施工期根据第一阶段回填量监测数据可以选择不同的手段进行处理, 若首次回填沉降较大, 则后期需减少沉井回填量, 以减小后期沉降。若第一次回填期间沉降较小, 则可减小施工等待期, 以缩短工期。

2.3 沉井倾斜情况分析

通过沉降数据, 不考虑未回填前的沉井倾角, 取沉降测量点3个, 求其空间平面曲线及法向量, 则法向量与竖直方向的夹角为沉井倾斜角, 沉井倾斜曲线见图6。

从图6中可以看出, 4个呈井在回填施工期间, 沉井倾斜值均控制在0.5°以内, 沉井倾斜姿态总体可控。沉井倾角变化主要集中在第一次回填期, 与沉降情况相对应。等待期倾角基本稳定, 4个沉井的变化量控制在0.1°以内, 沉井扭转姿态良好。第二次回填期倾角变化量大于等待期, 此时可根据前期沉井倾斜情况及时纠偏。总体上可以看出, 施工控制后的沉井可以有效减小倾斜情况。16号井由于第一次回填施工时回填不均匀, 导致沉井倾斜角度较大, 因此第二次回填期对其进行纠偏, 导致16号井4号监测点出现上移情况, 但其倾斜角度值变化不大。

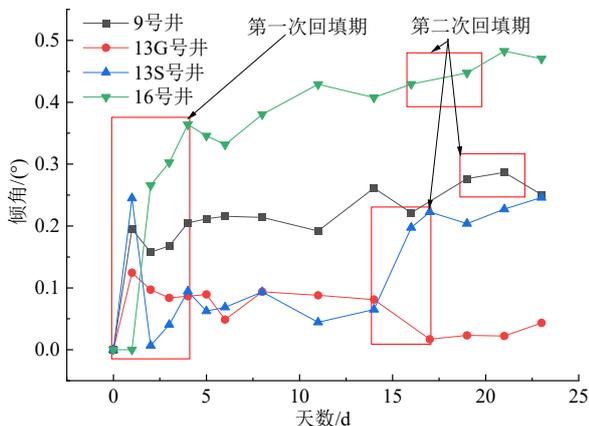


图6 沉井倾斜曲线
Fig. 6 Open caisson tilt curves

3 沉井工后沉降预测

3.1 沉降预测原理

软土地区由于土质地层参数、沉井施工条件、沉井设计、工后回填等复杂的条件, 工后沉降无法通过理论进行预测, 因此, 本文将探究双曲线法用于推算沉井回填后最终沉降量的适用性。双曲线法

建立在沉降曲线与双曲线相似的基础之上, 抗数据波动性强, 预测数据较稳定, 推算结果包括主固结最终沉降和次固结沉降, 可总体上认为是最终沉降量。则沉井最终沉降预测计算公式为:

$$S = S_0 + \frac{t - t_0}{\alpha + \beta(t - t_0)} = S_0 + S_f \quad (1)$$

式中: S_0 为沉井回填施工期沉降量; t_0 为沉井施工回填期时间; t 为时间, 开始时间由初始回填算起; S_f 为沉井回填完成后的沉降量; α 、 β 为待计算参数。

将式(1)变换为:

$$\frac{t - t_0}{S - S_0} = \frac{t - t_0}{S_f} = \alpha + \beta(t - t_0) \quad (2)$$

以 $(t - t_0)/S_f$ 和 $(t - t_0)$ 为坐标, 作出以截距为 α 和斜率为 β 的直线。将求得的 α 、 β 、 S_0 、 t_0 代入式(1), 就可以预测任意时刻 t 的下沉量 S_t 。

当 $t \rightarrow \infty$ 时, 即可求得最终沉降量 S_f :

$$S_f = S_0 + \frac{1}{\beta} \quad (3)$$

3.2 工后沉降结果及计算分析

对杭州湾标段9号井、13S号井、13G号井、16号井进行了工后沉降监测, 每个沉井设置沉降监测点, 工后沉降量与时间关系曲线见图7, 减去 S_0 后可以得到回填结束后的沉井工后沉降量, 见图8。

根据工后沉降量监测数据可以得到, 回填结束当天沉降量最大, 且沉降速率呈逐渐降低态势。回填结束后沉井稳定时间较快, 在回填结束10d后, 沉井沉降基本稳定, 因为沉井回填后的变形主要是由沉井底部土体的压缩引起的, 而沉井底部旁边的土体由于受到上部土体的作用, 不易发生侧向变形, 因此, 后期沉降量较小。

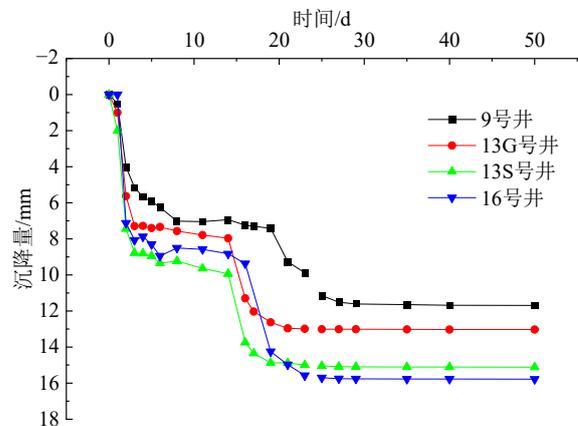


图7 沉井工后沉降量与时间关系曲线

Fig. 7 Relationship between post construction settlement of open caisson and time

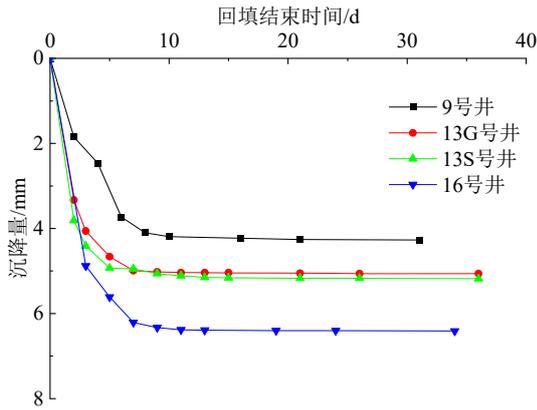


图8 回填结束后的沉井工后沉降量

Fig. 8 Post construction settlement of open caisson after backfilling

根据 50 d 沉降量监测数据,采用双曲线法进行沉降量预测,与相应的双曲线公式进行拟合,拟合关系如图 9 所示,根据拟合公式斜率及工后初始沉降量 S_0 求出最终沉降量,结果见表 3。

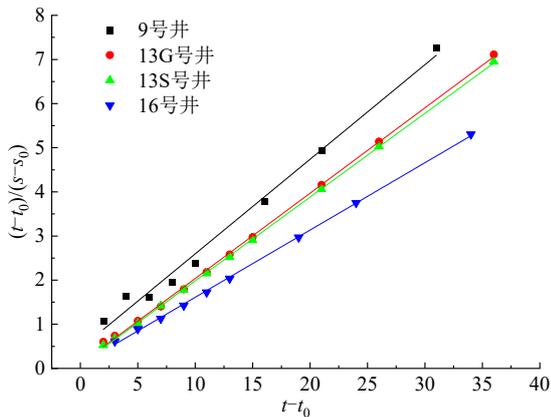


图9 工后沉降量线性拟合关系

Fig. 9 Linear fitting curves of post construction settlement

表3 沉井最终沉降量计算

Table 3 Calculation of final settlement of open caisson

| 沉井编号 | 截距 α | 斜率 β | S_0 /mm | 相关度 R^2 | 最终沉降量 S_f /mm |
|------|-------------|------------|-----------|-----------|-----------------|
| 9号 | 0.452 26 | 0.214 36 | 7.42 | 0.989 44 | 12.09 |
| 13G号 | 0.103 84 | 0.193 35 | 7.97 | 0.999 25 | 13.14 |
| 13S号 | 0.085 30 | 0.189 85 | 9.94 | 0.999 78 | 15.21 |
| 16号 | 0.086 32 | 0.152 48 | 9.37 | 0.999 21 | 15.93 |

注:方程为 $y=\alpha+\beta x$ 。

从表 3 可以看出,计算得到 9 号井最终沉降量为 12.09 mm, 13G 号井最终沉降量为 13.14 mm, 13S 号井最终沉降量为 15.21 mm, 16 号井最终沉降量为 15.93 mm。

采用双曲线法推测沉井工后沉降数据相关度较高,4 个沉井线性拟合平均相关度 99.69%,表明采用双曲线法预测沉井最终沉降量是可行的。根据

拟合数据,算出工后沉降拟合曲线,如图 10 所示,为回填过后工后沉降实测点及拟合曲线图。

从图 10 可以看出,拟合曲线与实际监测点沉降量基本一致。通过拟合曲线看,工后沉降在 10 d 内已经完成了大部分,与最终沉降量相比,9 号井、13G 号井、13S 号井、16 号井 10 d 内沉降量分别占最终工后沉降量的 82.5%、94.9%、95.7%、94.6%,在实际工程中,应注意回填后 10 d 内的沉降量监测,防止沉井与管道的沉降差过大导致管道破裂的情况发生。在 10 d 后,曲线基本平缓,与实际情况基本相符。

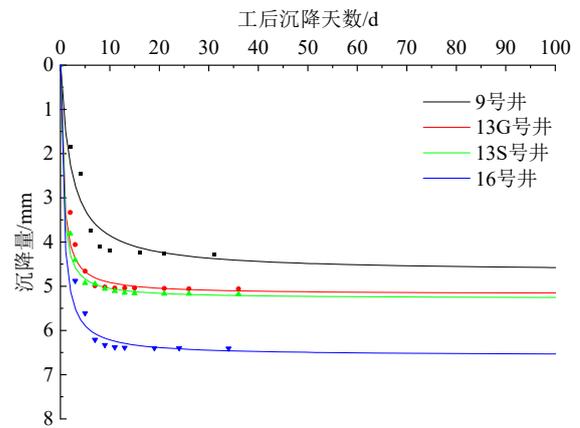


图10 工后沉降实测点及拟合曲线图

Fig. 10 Measured points and fitting curves of post construction settlement

4 讨论

沉井施工条件复杂,施工条件影响着沉井下部土体的应力分布,如开挖初期搅拌桩施工增加土体附加应力,土体开挖减小附加应力。而由于钢筋混凝土材料重度大于土体颗粒的重度,采用原土回填至原有标高实际增加了附加应力。可以看出,搅拌桩施工、土体的开挖深度以及沉井大小、壁厚、高度等条件均会影响附加应力的大小及分布,因此从土体附加应力这一角度讨论沉井沉降是复杂的,且容易出现较大的误差。通过双曲线法进行估算则排除了以上影响因素,可以得到准确的最终沉降量,对沉井的安全具有重大意义。

5 结论

以杭州湾引水工程沉井为研究对象,通过实际工程监测数据分析了沉井回填沉降规律,并对工后沉降数据进行分析,采用双曲线法对最终沉降量进行了预测。得到以下结论:

(1) 在该软土地区, 沉井回填期沉降主要为第一次回填施工期的沉降, 占总沉降的 54.5%~57.2%, 针对该阶段沉井沉降量, 给出了较为经济合理的处理手段, 减小后期管道拉裂风险。

(2) 沉井回填过后的工后沉降速率快速降低。沉井稳定时间较快, 在回填结束 10 d 后, 沉井沉降基本稳定, 主要由于沉井地基土很难发生侧向变形, 因此沉井工后沉降较小。

(3) 双曲线法预测能较好地解决通过土体参数计算工后沉降困难的问题, 能较准确地预测回填后沉井的最终沉降量, 与实际监测情况相符。4 个沉井工后最终沉降量预测为 12.09~15.93 mm。

(4) 软土地区由于土质地层参数、沉井施工条件、沉井设计、工后回填等复杂的条件, 工后沉降量无法通过理论进行预测, 通过实际监测数据进行沉井工后沉降预测是可行的, 可为沉井工程提供重要的参考。

参考文献

- [1] 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*, 2011, 137(5): 516-524.
- [2] JALBI S, SHADLOU M, BHATTACHARYA S. Impedance functions for rigid skirted caissons supporting offshore wind turbines[J]. *Ocean Engineering*, 2018, 150: 21-35.
- [3] 叶观宝, 高彦斌. 地基处理[M]. 第三版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
YE Guan-bao, GAO Yan-bin. *Ground Treatment*[M]. Third Edition. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009.
- [4] 潘林有, 谢新宇. 用曲线拟合的方法预测软土地基沉降[J]. *岩土力学*, 2004, 25(7): 1053-1058.
PAN Lin-you, XIE Xin-yu. Observational settlement prediction by curve fitting methods[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2004, 25(7): 1053-1058.
- [5] 黄广军. Asaoka 法预测软土地基沉降时存在的问题和对策[J]. *岩土力学*, 2016, 37(4): 1061-1065, 1074.
HUANG Guang-jun. Problems and their solutions in predicting soft ground settlement based on Asaoka's method[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 37(4): 1061-1065, 1074.
- [6] 张仪萍, 曹国强, 李涛, 等. 分级加载条件下沉降预测方法[J]. *中国公路学报*, 2005, 18(1): 30-33.
ZHANG Yi-ping, CAO Guo-qiang, LI Tao, et al. Prediction method of settlement under multi-stage loading[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2005, 18(1): 30-33.
- [7] 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.
CHEN Xiao-ping, QIAN Ping-yi, ZHANG Zhi-yong. Study on penetration resistance distribution characteristic of sunk shaft foundation[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2005, 27(2): 148-152.
- [8] 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.
ZHOU He-xiang, MA Jian-lin, LI Jun-tang, et al. Field monitoring of sinking resistance of large and deep caisson[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2019, 36(7): 81-89.
- [9] 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): 1136-1143.
ZHU Jin-song, MENG Qing-ling, QI Hai-dong, et al. Distribution characteristics of side wall friction of large open caisson foundation[J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2019, 49(6): 1136-1143.
- [10] JEONG J S, LEE J C, KIM H W, 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.
- [11] CHAVDA J T, MISHRA S, DODAGOUDAR G R. Experimental evaluation of ultimate bearing capacity of the cutting edge of an open caisson[J]. *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, 2020, 20(5): 281-294.
- [12] 赵明华, 郑焕然, 刘煜. 滨海软土路基最终沉降量预测研究[J]. *广西交通科技*, 2003, 28(5): 13-15, 19.
ZHAO Ming-hua, ZHENG Huan-ran, LIU Yu. Final settlement forecast of roadbed by offshore soft clay[J]. *Guangxi Communication Science and Technology*, 2003, 28(5): 13-15, 19.
- [13] 曾国熙, 杨锡令. 砂井地基沉陷分析[J]. *浙江大学学报*, 1959(3): 34-72.
ZENG Guo-xi, YANG Xi-ling. Analysis of sand well foundation settlement[J]. *Journal of Zhejiang University*, 1959(3): 34-72.
- [14] ASAOKA A. Observational procedure of settlement prediction[J]. *Soils and Foundations*, 1978, 18(4): 87-101.