

DOI: 10.11779/CJGE2024S20039

压入式沉井与反力桩对地表沉降的耦合影响研究

张中杰¹, 王啸翔^{2,3}, 俞剑^{2,3}, 黄茂松^{2,3}, 王浩然¹

(1. 上海市城市建设设计研究总院(集团)有限公司, 上海 200125; 2. 同济大学土木工程学院地下建筑与工程系, 上海 200092;

3. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092)

摘要: 利用压入式连续沉井群建造轨交地下车站是一种新型预制装配建造模式, 但相较传统的明挖式基坑车站修建方式, 目前尚缺乏对沉井压入过程环境影响的研究。为此, 本研究以实际工程案例为背景, 通过数值模拟, 结合现有实测拟合沉降曲线, 对比调查了沉井外侧反力桩的存在与否对地表沉降剖面的影响规律; 进一步调查了桩间距对于地表沉降的调控作用; 并基于抗拔承载力等效原则, 同时探究了桩间距和桩径对周边土体沉降的影响。进而形成了桩外侧和桩间土体沉降剖面的修正归一化曲线, 为压入式连续沉井群地下车站在高密度城市中心的实施提供参考支撑。

关键词: 压入式沉井; 地表沉降; 反力桩; 数值模拟

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2024)S2-0119-05

作者简介: 张中杰(1976—), 男, 正高级工程师, 主要从事岩土工程方面的设计和研究工作。E-mail: vincentstucdri@126.com。

Coupling effects of pressed caisson and uplift piles on surface settlement

ZHANG Zhongjie¹, WANG Xiaoxiang^{2,3}, YU Jian^{2,3}, HUANG Maosong^{2,3}, WANG Haoran³

(1. Shanghai Urban Construction Design & Research Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200125, China; 2. Department of Geotechnical

Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of

Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Constructing underground railway stations using the pressed continuous caisson group is a new type of prefabricated assembly construction mode. However, compared to the traditional open-pit excavation method of station construction, there is currently a lack of research on the environmental impact of the caisson pushing process. Therefore, taking the actual projects as a background, this study conducted numerical simulations and combined existing measured data to fit subsidence profile curves. The influences of the presence or absence of the reactive piles outside the caissons on the surface settlement profile are investigated. Further investigations are done on the regulation effects of pile spacing on the surface settlement. Based on the principle of the equivalent anti-pulling bearing capacity, the influences of pile spacing and pile diameter on the settlement of the surrounding soil are also explored. Consequently, a modified normalization curve for the settlement profile of the soil outside and between piles is formed, and it may provide reference support for the implementation of the underground stations with pressed continuous caisson group in densely populated urban centers.

Key words: pressed caisson; surface settlement; uplift pile; numerical simulation

0 引言

沉井法是一项传统的地下工程施工工艺, 在大型桥梁墩台基础、地下工业厂房等场景应用广泛, 但传统下沉工艺存在沉井姿态纠偏困难、下沉缓慢等弊端, 压入式沉井借助反力装置, 将沉井压入土体, 可消除土层差异的不利影响, 实现下沉全过程的有效控制。

为此, 利用压入式连续沉井群构建地下车站成为了可能(如图 1 所示)。类似明挖式基坑修建方式, 沉井下陷过程会不断扰动周围土体, 评估和预测沉井施工对周边环境的影响有助于保护相邻设施, 但目前对

沉井压入过程环境影响的研究主要集中在现场实测。

徐鹏飞等^[1]分析了沉井压沉过程周边土体监测数据, 研究了压入式沉井施工对周边环境的影响。邓友生等^[2]对比分析监测数据与有限元结果, 研究了沉井对邻近建筑物的影响。罗实瀚等^[3]分析地锚式沉井施工过程的现场监测数据, 探讨了施工对周边环境的影响。上海市地标《地下工程预制装配技术标准》^[4]通

基金项目: 上海市自然科学基金项目(23ZR1468500)

收稿日期: 2021-06-22

*通信作者(E-mail: 002yujian@tongji.edu.cn)

过总结上述实测数据,推荐了井外地表沉降剖面曲线。

上述研究均未考虑反力桩存在对土体沉降规律的影响,本文以某车站沉井工程为例,通过数值模拟分析压入式沉井施工对环境的影响,进一步研究桩间距对地表沉降的调控作用,并基于抗拔力等效原则,同时探究桩间距和桩径对周边土体沉降变化的影响。

1 工程概况

如图 1 所示,某沉井群工程项目为地下车站,主体长 283.4 m,沿纵向分为 7 节沉井,两个端头井各 1 节,分别为#1、#7 沉井,标准段 5 节,分别为#2~#6 沉井,各沉井相邻纵向净距 2.5 m。

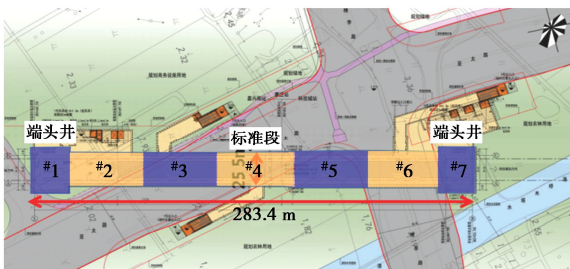


图 1 连续沉井车站总平面图

Fig. 1 General layout of station with continuous caissons

车站主体结构 7 节沉井均采用压入式沉井法施工,如图 2 (a) 所示,通过千斤顶提供下压力,将沉井压入土体。同时在外侧设置反力桩,用于平衡反力以及控制地表沉降,本工程反力桩沿车站纵向边界布置,桩间距(相邻桩侧至桩侧的距离) 3.5 m,桩中心距离井壁边 1.5 m,采用桩径 1000 mm 灌注桩,桩长 48 m。

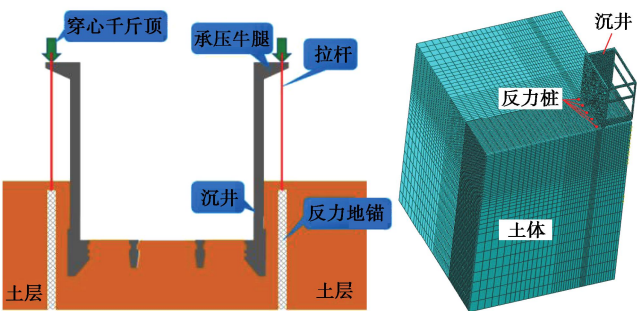


图 2 压入式沉井示意图

Fig. 2 Schematic diagram of pressed caisson

2 沉井贯入数值模拟

为分析沉井贯入引起的周边地表沉降,采用 ABAQUS 软件进行数值模拟。取标准段沉井建模,长 44.42 m,宽 25.5 m,深 24.8 m,侧壁厚 1 m,内部隔墙厚 0.5 m;土体模型长 73 m,宽 63 m,高 96 m。根据结构对称性,建立如图 2 (b) 所示 1/4 有限元模型。

除实际工况外,本文还设置 14 根和 20 根桩径为 1 m 的两种工况,以研究桩间距对于地表沉降的调控作用。数值模拟的不同工况参数如表 1 所示。

同时,为依据抗拔承载力等效原则分析不同直径反力桩对地表沉降的影响,参考 API 规范^[5]中抗拔桩侧摩阻力计算方法:

$$f = \alpha c \quad , \quad (1)$$

式中: α 为摩擦因子; c 为该点土体不排水抗剪强度。

抗拔承载力,即桩侧总摩阻力,为桩身各点侧摩阻力之和,与桩身侧面积正相关。抗拔力等效原则可近似表述为总桩侧面积相等。基于此获得与实际工程具有一致抗拔承载力的工况 4, 5, 具体参见表 1。

表 1 数值模拟工况介绍

Table 1 Case studies for numerical simulation

工况	桩径 D/m	桩间距 s/m	桩数	评述
0	—	—	—	无反力桩
1	1	3.5	10	实际工况
2	1	2.3	14	桩间距影响
3	1	1.2	20	
4	0.5	1.7	20	与工况 1 抗拔等效
5	0.25	0.85	40	

采用罚函数控制沉井-土体、反力桩-土体的接触,设置摩擦系数 0.4,通过设置极限剪应力以控制反力桩极限抗拔力;采用“生死单元”模拟井内土开挖过程。

该工程采用不排水下沉施工方式,为确保数值模拟与实际情况相符,土体重度采用有效重度。

在沉井埋深范围内第④层土占比超过 50%,且对该层土物理力学性质研究较为深入,故选取该层土进行单一地层模拟,采用 ABAQUS 内置运动硬化土体本构模型,沉井及反力桩均采用弹性本构模型。沉井、反力桩及土体材料参数见表 2, 3。

表 2 沉井、反力桩材料参数

Table 2 Material parameters of caissons and uplift piles

结构物	弹性模量/GPa	泊松比
沉井、反力桩	30	0.3

表 3 第④层灰色淤泥质黏土材料参数

Table 3 Material parameters of gray silty clay of Layer 4

材料参数	数值
重度/($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	16.4
弹性模量/kPa	69502
不排水抗剪强度/kPa	27
泊松比	0.49
初始屈服应力 A	2.7
运动硬化参数 C1	16712
Gamma1	325

3 沉井贯入环境影响分析

3.1 沉井贯入地表沉降分析

在不考虑反力桩的情况下,沿沉井长边中点、长边角点、短边中点、短边角点 4 个典型断面,研究沉

井下沉到设计标高时地表沉降, 结果如图 3 所示。

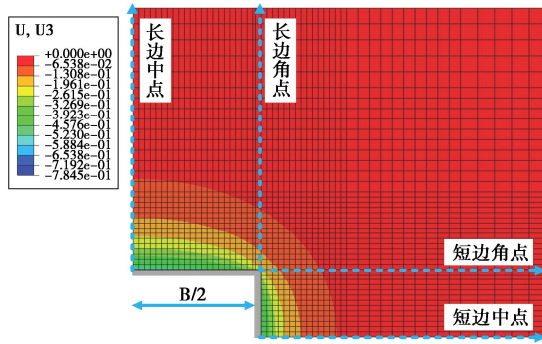


图 3 地表沉降结果及剖面示意图 (无反力桩)

Fig. 3 Contours of surface settlement and cross-section

对于单一沉井, 上海市地标《地下工程预制装配技术标准 (轨道交通工程)》^[4]中根据实测结果对地表沉降最大值和下限值进行了拟合:

$$\frac{\Delta_{vm}}{H}(\%) = 0.016 \left(\frac{H^2}{t^2} - 1 \right), \quad (2)$$

$$\begin{cases} \frac{\Delta_v}{\Delta_{vm}} = -0.95 \frac{d}{H_c} + 1 & 0 \leq \frac{d}{H_c} \leq 0.75 \\ \frac{\Delta_v}{\Delta_{vm}} = -0.23 \frac{d}{H_c} + 0.46 & 0.75 \leq \frac{d}{H_c} \leq 2 \end{cases}. \quad (3)$$

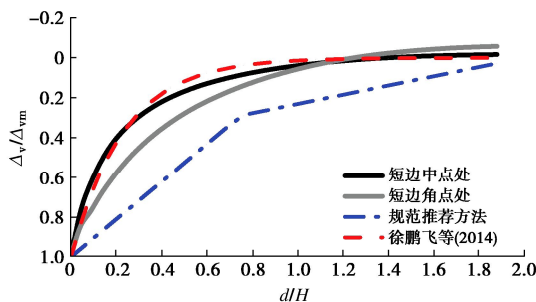
式中: d 为距井壁距离; H 为沉井贯入深度; t 为井内土塞高度, 本工程取 2 m; Δ_{vm} 为最大地表沉降。

徐鹏飞等^[1]根据沉井施工过程的地表沉降监测数据, 拟合得到指数型地表沉降分布曲线方程:

$$\frac{\Delta_v}{\Delta_{vm}} = e^{-4.3 \frac{d}{H}}. \quad (4)$$

沿 4 个断面提取地表沉降曲线, 并与徐鹏飞等^[1]及规范方法^[4]进行对比, 如图 4 所示, 其中, Δ_v 为该断面地表沉降; Δ_{vm} 为该断面最大地表沉降。

由图 4 可知, 本文地表沉降曲线与徐鹏飞等^[1]及规范方法^[4]在发展趋势上较为吻合; 本文地表沉降最大值 55.67 cm 与规范方法最大值 62.1 cm 存在约 10% 的误差, 后者相对更为保守; 沉井贯入时长短边引起的地表沉降存在差异; 水平方向 0~15 m 内地表沉降较为明显, 大于 15 m 对地表沉降影响较小, 与规范方法设置 $d/H=0.55$ 为地表沉降曲线分界点较为符合。



(a) 沉井长边地表沉降

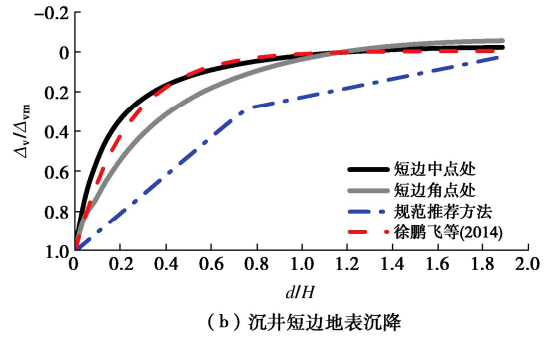


图 4 沉井贯入地表沉降剖面

Fig. 4 Profile of surface settlement due to penetration of caissons

3.2 反力桩对沉井贯入地表沉降影响分析

(1) 实际工况数值模拟结果

实际施工时, 在井外侧均匀布置 10 根桩径为 1 m 的反力桩。本文对实际工况进行模拟, 位移云图如图 5 所示, 选取沉井长边中点处提取地表沉降, 如图 6 所示, 其中 Δ_{vm}^f 为没有桩基时桩外侧处的土体沉降值。

结合图 5, 6 可知, 反力桩会极大的改变地表沉降的分布规律。由于桩基竖向刚度远大于周围土体, 所以桩外侧土体沉降显著减少, 又由于实际工况桩间距较大, 所以桩间土的沉降规律更接近于不考虑反力桩时的土体沉降, 因此沉井外侧的差异沉降较为显著。

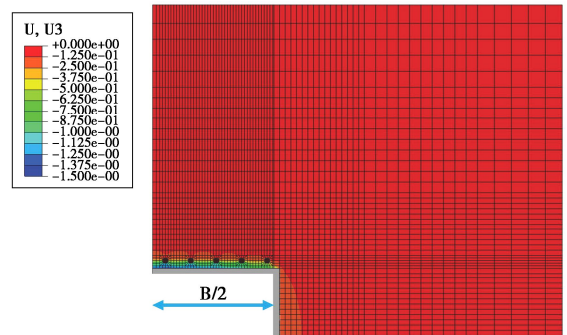


图 5 地表沉降结果云图 (工况 1)

Fig. 5 Contours of surface settlement

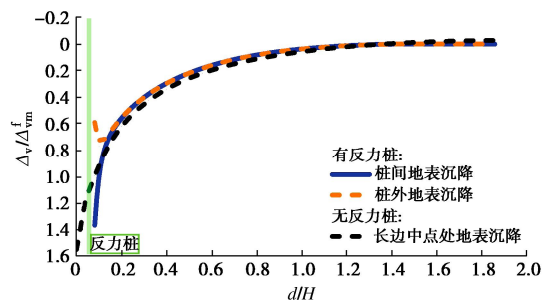


图 6 工况 1 (实际工况) 地表沉降剖面

Fig. 6 Profiles of surface settlement for actual working condition

(2) 桩间距对地表沉降的影响

工况 2, 3 在保持桩径不变情况下, 将桩数加密, 以调查桩间距 s 对地表沉降的调控作用, 选取沉井长边中点处提取地表沉降, 如图 7 所示。

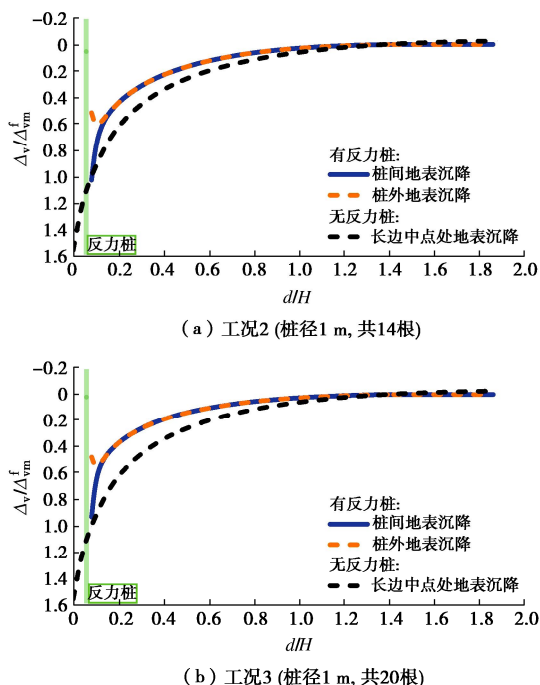


图 7 桩间距对地表沉降剖面的影响

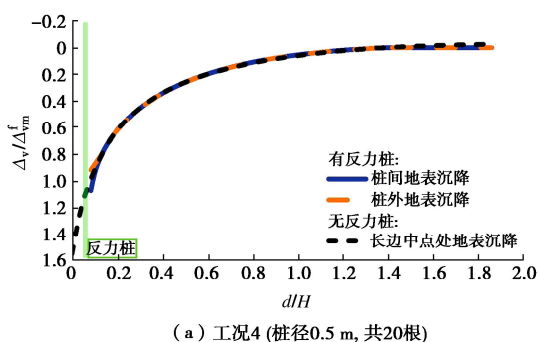
Fig. 7 Profiles of surface settlement under different pile distances

显然, 随着桩数的增加, 反力桩的隔离效应更为显著, 桩外侧和桩间土体沉降都得到了显著减少, 与无反力桩的地表沉降相比, 沉降的影响范围也得到显著改善。

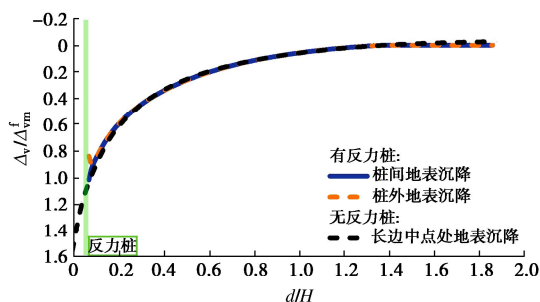
(3) 抗拔等效下桩径对地表沉降的影响

桩基原为提供下压力所设, 故在与实际工况抗拔等效前提下讨论桩径对地表沉降的影响。针对工况 4, 5, 选取沉井长边中点处提取地表沉降, 如图 8 所示。

图 7 (b), 8 (a) 对比了同为 20 根反力桩时桩径 1 m 和 0.5 m 时的井外沉降, 可见桩径增加可显著改善井外的影响范围, 桩径减小会使得沉降剖面更接近无反力桩的情况。



(a) 工况 4 (桩径 0.5 m, 共 20 根)



(b) 工况 5 (桩径 0.25 m, 共 40 根)

图 8 不同反力桩尺寸对应的地表沉降曲线

Fig. 8 Profiles of surface settlement under different pile sizes

工况 1 (图 6)、工况 4 和 5 (图 8) 的沉降剖面对比发现, 在抗拔力等效时, 井外侧土体沉降趋势基本一致。具体到桩外侧的土体沉降, 随着桩径的减小也会显著减少对土体沉降的约束效果。

3.3 沉井压入与反力桩地表沉降归一化响应

为进一步研究桩间距对地表沉降的影响效果, 同时分析桩间距和桩径对周边土体沉降的耦合影响, 在上述 5 种工况的基础上补充以下两种工况:

工况 6: 保持桩径 1 m 不变, 将桩数减少到 6 根;

工况 7: 以实际工程中 10 根桩径为 1 m 抗拔桩所提供的反力为基准, 设置 8 根桩径 1.25 m 反力桩。

对不同工况下反力桩间地表最大沉降进行归一化处理, 如图 9 所示。其中, Δ_{vm}^s 为有反力桩情况下桩间土最大沉降; Δ_{vm}^f 为无反力桩情况下桩间土最大沉降所在处对应的地表沉降; B 为沉井长边边长。

随着归一化桩间距 s/B 的减少 (桩加密), 桩间土体沉降较不考虑反力桩时有所改善, 但随桩间距拉大, 桩间未受反力桩约束的土体范围随之扩大, 由沉井贯入对土体产生的部分拖拽作用从桩周转移至不受约束的桩间土体, 使其承受较之前更大的拖拽作用, 土体沉降反而会大于不考虑反力桩时的地表沉降, 增大的幅度会随着 s/B 的增加而趋于稳定。当然, 值得注意的是, 该结论仅在确有一定数量的反力桩时成立, 因为随着桩间距不断拉大, 沉降的增幅显然会回归至 1, 即不考虑反力桩时的情况。

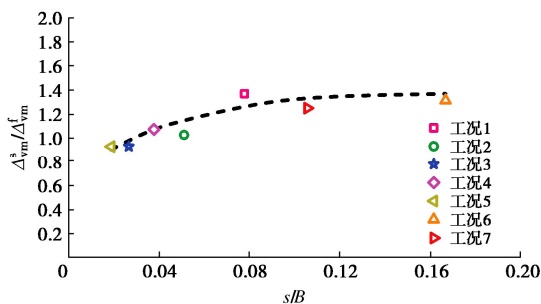


图 9 桩间距对桩间土沉降的影响

Fig. 9 Effects of pile spacing on surface settlement

对桩外侧地表最大沉降进行归一化处理, 如图 10 所示。其中, Δ_{vm}^p 为有反力桩情况下桩外侧土最大沉降; 横轴 $(D/B)(B/S)^{0.25}$ 为同时对桩间距和桩径的归一化形式, 它表述了桩径增加或桩间距减小, 会减小桩外侧地表最大沉降。图 9, 10 中的归一化曲线, 可结合式 (3) 或者规范推荐的沉降剖面以预估反力桩对沉井外侧地表沉降的影响, 进而通过合理设置反力桩直径和间距, 达到调控井外土体沉降的目标。

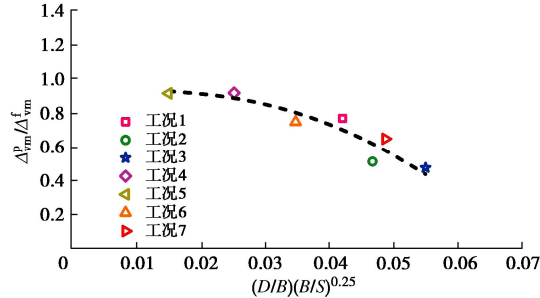


图 10 桩间距与桩径对桩侧土体沉降的耦合影响

Fig. 10 Coupled effects of pile spacing and pile diameter on surface settlement

4 结 论

通过分析压入式沉井外侧反力桩, 探究了反力桩对沉井贯入诱发地表沉降的影响, 主要得到以下 4 点结论。

- (1) 沉井贯入引起的地表沉降在井外壁处最大, 最大值在长边中点处。
- (2) 反力桩会改变地表沉降分布规律。桩外侧土沉降显著减少, 而桩间土沉降规律更接近于不考虑反力桩时的结果, 因此沉井外侧的差异沉降较为显著。
- (3) 桩径相同情况下, 随桩数增加, 反力桩隔离效应更为显著, 土体沉降显著减少, 沉降影响范围显著改善。桩数相同情况下, 桩径增加可改善沉降影响范围, 桩径减小会使沉降剖面更接近无反力桩情况。
- (4) 形成了桩外侧和桩间土体沉降剖面的修正的

归一化曲线, 为压入式连续沉井群地下车站在高密度城市中心的实施提供参考支撑。

参考文献:

[1] 徐鹏飞, 李耀良, 徐 伟. 压入式沉井施工对环境影响的现场监测研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(4): 1084-1094. (XU Pengfei, LI Yaoliang, XU Wei. Field measurement and analysis of influence of jacked open caisson construction on environments[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(4): 1084-1094. (in Chinese))

[2] 邓友生, 万昌中, 闫卫玲, 等. 大型圆形沉井结构应力及其周边沉降计算[J]. 岩土力学, 2015, 36(2): 502-508. (DENG Yousheng, WAN Changzhong, YAN Weiling, et al. Stress of large cylindrical caisson structure and its adjacent settlement[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(2): 502-508. (in Chinese))

[3] 罗实瀚, 徐 伟. 地锚式沉井压入施工阶段对环境影响监测成果分析[J]. 建筑结构, 2016, 46(8): 100-105. (LUO Shihan, XU Wei. Analysis of monitoring results of environmental impact on anchor caisson in pressing construction phase[J]. Building Structure, 2016, 46(8): 100-105. (in Chinese))

[4] 地下工程预制装配技术标准 (轨道交通工程)[S]. 上海: 同济大学出版社, 2024. (Technical Code for Prefabricated Assembly of Underground Engineering (Rail Transit Engineering)[S]. Shanghai: Tongji University Press, 2024. (in Chinese))

[5] American Petroleum Institute. Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platform-Load and Resistance Factor Design[S]. Washington D C, 2010.

(编校: 黄贤沙)