

DOI: 10.3785/j.issn.2096-7195.2024.02.012

【新装备新工艺】

下沉式竖井掘进工法在软土地区的应用研究

翟之阳, 聂东清*, 张毅, 陈宏森, 周质炎

(上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海 200092)

摘要: 城市地区的深层地下管网建设产生了大量超深竖井建设需要, 而传统施工技术难以同时满足超深竖井施工低影响、高效且节约的需求。为此, 本文介绍了一种新型施工技术——下沉式竖井掘进工法(VSM), 与沉井工法、地下连续墙围护开挖工法等传统施工方法相比, 该工法具有施工速度快、环境友好、工程造价低等优点。通过对VSM工法特点的总结, 探讨了基于该工法的超深竖井设计要点。该工法应用于软土地区时, 应注意需要满足土体抗隆起稳定性及地基承载力要求。最后, 介绍了上海软土地区首个采用VSM工法的超深竖井工程。对该竖井施工过程的监测结果表明, VSM工法在上海软土地区有较好的适用性, 竖井开挖施工对周边环境的影响可满足上海地区环境保护等级为一级的基坑变形控制要求。

关键词: 沉井; 超深竖井; 下沉式竖井掘进工法; 竖井设计; 现场监测

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2024)02-0201-07

Application of vertical shaft sinking method in soft soil area

ZHAI Zhi-yang, NIE Dong-qing*, ZHANG Yi, CHEN Hong-sen, ZHOU Zhi-yan

(Shanghai Municipal Engineering Design General Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China)

Abstract: The construction of deep underground pipe networks in urban areas has generated a large number of ultra-deep shaft construction needs. However, the traditional construction technologies are difficult to meet the low-impact, high-efficiency, and economical requirements of ultra-deep shaft construction at the same time. A new construction technique, vertical shaft sinking method (VSM), was introduced in this work. Compared with traditional construction methods such as caisson construction method and underground diaphragm wall enclosure excavation method, it has the advantages of fast construction speed, environmental friendliness, and low construction cost. By summarizing the characteristics of VSM, the key points of ultra-deep shaft design based on VSM were discussed. When VSM is applied to soft soil areas, attention should be paid to meeting the requirements of soil anti-uplift stability and foundation bearing capacity. Finally, the first ultra-deep shaft case using the VSM in the soft soil area of Shanghai was introduced. The measured results of the shaft construction process show that the VSM had good applicability in the soft soil area of Shanghai. The impact of shaft excavation on the surrounding environment could control the deformation of foundation pits in the Shanghai area with an environmental protection grade of level one.

Key words: shaft sinking; ultra-deep shaft; vertical shaft sinking method; shaft design; field monitoring

0 引言

随着城市建设水平不断提高, 浅层地下空间的利用已逐渐趋于饱和, 地下管网系统向着深层地下空间发展。大埋深管道建设采用盾构或顶管法施工时, 需间隔设置一定数量的施工竖井, 由此产生了大量开挖深度远超平面直径的超深竖井建设需要。

沉井工法因施工简单、施工工期短等原因, 曾广泛用于竖井建造。但传统沉井施工控制精度差, 对周边环境影响大, 因此近年来的应用越来越少, 尤其在软土区的建筑物密集地区基本停止使用。目前, 软土地区的超深竖井建设多采用地下连续墙围护开挖方式, 其优点是施工对周边环境影响小, 但是造价高昂, 且施工周期长。

收稿日期: 2022-09-17

基金项目: 上海建工集团股份有限公司重点科研项目(22YJKF-19)。

作者简介: 翟之阳(1983—), 男, 江苏常州人, 硕士, 高级工程师, 主要从事给排水结构设计与研究。E-mail: zhaizhiyang@smedi.com。

*通信作者: 聂东清(1990—), 男, 安徽安庆人, 博士, 高级工程师, 主要从事基坑工程设计与研究。E-mail: niedongqing@smedi.com。

随着自动化、智能化的工程技术发展,自动化设备越来越多地应用于竖井施工。代表性的设备包括海瑞克公司研发的下沉式竖井掘进机 VSM (Vertical Shaft Sinking Machine) 和中铁工程装备集团研发的沉井掘进机 CJM (Chen Jing Machine) [1-2]。这些新型竖井施工设备可通过潜水机械实现竖井水下开挖和下沉,并对下沉过程进行精细化控制,解决了传统沉井控制精度差、环境影响大的问题。同时,由于取消了大深度地下连续墙及水平支撑结构的施工过程,可以较低的工程造价实现更高的施工效率。

本文对下沉式竖井掘进工法 (VSM) 的主要施工流程及特点进行介绍。根据这些特点,提出了基于 VSM 工法的竖井设计方法。最后介绍了上海首个采用 VSM 工法的超深竖井。监测结果显示, VSM 工法在上海软土地区应用时,对周边环境影响较小,表明该工法具有推广价值。

1 下沉式竖井掘进工法介绍

1.1 主要设备及施工流程

VSM 下沉施工示意图如图 1 所示。其中, VSM 主机固定在竖井刃脚上部的井壁结构上,用于下沉过程中土体开挖;供给卷扬塔用于收放 VSM 主机的电缆、管线等;回收卷扬用于检修时起吊 VSM 主机;沉降单元主要由拉索千斤顶和锚固在竖井刃脚底部的钢绞线组成,用于控制竖井下沉;泥水处理系统用于处理开挖产生的泥浆。此外, VSM 系统还包括监测及控制系统,保证竖井施工安全可控。

竖井结构可采用钢结构或钢筋混凝土结构。采用钢筋混凝土结构时,可以现场浇筑,也可以采用预制管片现场拼装。

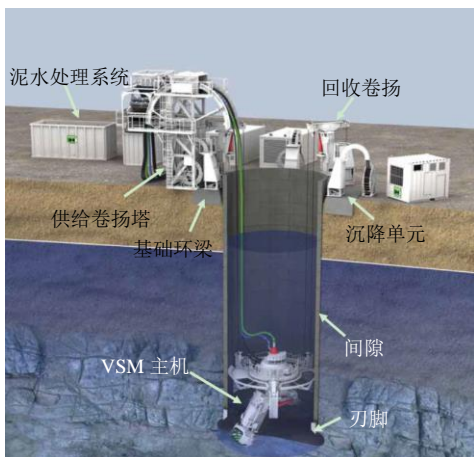


图 1 VSM 下沉施工示意图

Fig. 1 Schematic of the vertical shaft sinking method

VSM 主要施工流程如下:

(1) 在竖井外侧浇筑一圈基础环梁,用于承受供给卷扬塔、回收卷扬、沉降单元在施工过程中的竖向荷载。

(2) 圈梁内侧施工刃脚和下部井体结构,刃脚内设置钢绞线,之后在井内部安装 VSM 主机系统。

(3) 安装供给卷扬塔、回收卷扬、沉降单元等地面设备,沉降单元通过钢绞线与竖井刃脚连接。

(4) 进行开挖下沉施工。开挖与下沉循环进行。开挖时,主机通过其下部伸缩臂上的刀盘切削竖井刃脚下土体,开挖至程序设定深度,每次下沉深度可根据地层条件设定和调整;然后通过沉降单元将竖井缓慢向下沉放。竖井下沉时,在竖井内侧沿四周设置 3~4 处测斜管,每完成一定下沉深度即监测一次井体倾斜状况,随时调整竖井姿态。如此循环直至下沉到设计标高。需指出的是,为便于竖井下沉,主机开挖时,开挖直径略大于竖井直径,因此会在土层与竖井之间产生 5~10 cm 的间隙,间隙一般用膨润土泥浆填充,用来平衡侧向土压力作用,如图 1 所示。对不同土层,一般通过提高泥浆重度及泥浆液位高度保证侧壁稳定。

(5) 下沉完成后,吊出 VSM 主机,进行水下混凝土封底,并用水泥浆液置换间隙内的膨润土泥浆,提高井壁与土体的接触面强度。最后排空井内泥水,完成竖井施工。

1.2 工法特点

根据 VSM 工法施工流程,可以看出该工法主要有以下特点:

(1) 自动化的水下开挖施工,可以减少传统沉井或基坑降水引起的周边地面沉降。对于超深竖井,可解决抗承压水稳定问题。

(2) 刃脚以下及环向的超挖影响坑底及环向土层稳定性,对于软土地区需要考虑超挖的影响。另一方面,环向超挖使得竖井下沉时与土层之间几乎不产生摩擦,因此下沉过程造成的地面沉降很小。

(3) 竖井井壁依靠沉降单元进行沉放,竖井重力荷载通过钢绞线传递至沉降单元,最终由基础环梁承担。根据设备布置,基础环梁还需要承担回收卷扬和供给卷扬塔的荷载。

2 基于 VSM 工法的竖井设计

由于 VSM 工法与传统沉井或基坑施工都有明显区别,因此需要针对其工法施工工况的特点选取关键工况,验算竖井施工及使用阶段的内力、变形及稳定性等。

2.1 稳定性验算

由于VSM竖井为不排水下沉,一般不存在抗倾覆、抗渗流或抗承压水稳定等问题。但由于刃脚下土体超挖,当坑底土较弱时,坑底稳定性难以保证。目前,基坑坑底抗隆起验算一般采用基于地基承载力的验算方法^[3],该方法是基于大面积基坑模型推导而来^[4-5],应用于狭窄基坑稳定性分析会偏于保守^[6],但该方法已有较多应用经验,本文中VSM竖井抗隆起验算仍采用这一方法。计算时将坑内土体重度项改为开挖面以上井内水重度。计算式如下,抗隆起验算示意图见图2。

$$\frac{\gamma_{02}DN_q + c_k N_c}{\gamma_{01}(H+D) + q_k} \geq K_{RL} \quad (1)$$

式中: γ_{01} 为坑外地表至竖井开挖面各土层重度的加权平均值, kN/m^3 ; γ_{02} 为坑内水位至竖井开挖面的水或泥浆重度, kN/m^3 ; H 为坑外地表至坑内水面深度, m ; D 为坑内水面至开挖面深度, m ; K_{RL} 为抗隆起安全系数要求值。其余各参数定义详见文献^[3]。

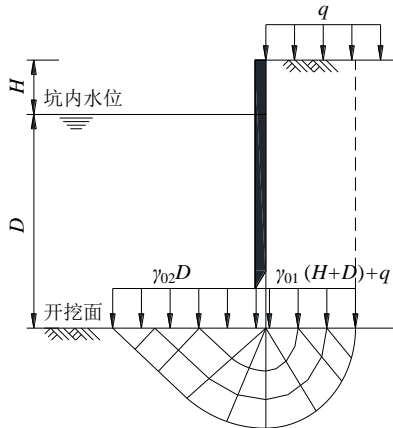


图2 抗隆起验算示意图

Fig. 2 Diagram of anti-uplift stability analysis

根据文献^[7]规定,沉井下沉还需要验算下沉系数及下沉稳定系数。根据VSM工法的施工特点,竖井下沉时,竖井井壁与土层之间存在缝隙,且由泥浆填充,竖井下沉侧阻力较小;刃脚下土体在下沉前进行超挖,即竖井下部不存在土塞,因此,下沉阶段土体阻力很小,下沉系数容易满足。另一方面,竖井下沉由位于地面的沉降单元通过放松连接在刃脚下的钢绞线进行控制(图3),因此不存在突沉的问题,下沉稳定性可以有效控制。

此外,沉井尚需验算封底后及使用阶段的抗浮稳定性。对于有永久使用需要的竖井,封底后浇筑底板及内部结构,造成自重增加,因此抗浮稳定性主要由封底阶段控制。竖井封底阶段抗浮计算可参

考下式:

$$\frac{G_0 + G_1 + F_s}{F_{fw}} \geq K_{fw} \quad (2)$$

式中: G_0 为竖井总重力, kN ; G_1 为封底混凝土重力, kN ; F_s 为竖井井壁与土体总摩阻力, kN ; F_{fw} 为水浮力, kN ; K_{fw} 为抗浮安全系数要求值。

对于地下水位高的软土地区,仅依靠竖井自重及井壁侧摩阻力可能难以满足抗浮要求,此时可考虑设置抗拔桩。



图3 位于刃脚下的钢绞线

Fig. 3 Steel strands under the cutting edge

2.2 承载力验算

VSM竖井采用悬吊式的沉放方式,因此地面设备如沉降单元、回收卷扬等承受很大的竖向荷载。在软土地区,基础环梁下持力层承载力难以满足荷载要求,可考虑在环梁下设置桩基础。此时,桩基承载力应满足竖井自重、基础环梁自重以及环梁上的设备荷载要求。

另外,当竖井封底阶段抗浮不能满足要求时,桩基础可作为抗拔桩共同承担浮力作用。这要求在竖井封底抽水之前建立基础环梁与竖井结构的可靠连接。

需要特别注意的是,由于基础环梁径向宽度有限,桩基离竖井距离较小,竖井下沉时可能导致桩基的侧向土体松动。因此,桩基竖向承载力应进行折减,合理的折减系数取值还有待进一步研究。

2.3 竖井结构设计

VSM竖井结构可以采用混凝土现浇或者预制装配结构。采用预制装配结构的优点是在工厂预制片管片,现场拼装成为整体后下沉,可有效缩短现场施工工期。采用混凝土现浇结构的优点是整体性较好,但竖井下沉时需要分段浇筑,工期较长。当作为顶管或盾构工作井时,由于井壁需要设置较大预留洞口,竖井采用混凝土现浇结构更为可靠。

竖井结构计算分析可参考文献^[7]关于圆形沉井的计算规定。下沉及封底阶段,假定在互成 90° 的两点处土的内摩擦角差值为 $4^\circ \sim 8^\circ$,此时该两点

处土压力强度分别为 p_A 和 p_B ，如图4所示，其余位置的土压力可按下列式计算：

$$p_\theta = p_A(1 + \omega' \sin \theta) \quad (3)$$

$$\omega' = \frac{p_A}{p_B} - 1 \quad (4)$$

式中： p_θ 是与A点夹角为 θ 处作用在竖井上的土压力强度。

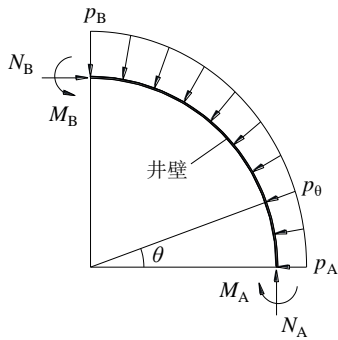


图4 作用在竖井井壁的土压力

Fig. 4 Earth pressure acting on the shaft wall

竖井结构受力主要由下沉阶段、封底阶段及使用阶段等工况控制。其中，竖井下沉阶段，井壁外侧间隙用泥浆填充，而井内保持高水位，竖井结构实际受力不大。因此，竖井结构受力主要由封底后的抽水阶段及使用阶段控制。

除此以外，竖井结构设计时还应计算封底混凝土

土厚度，以便确定竖井的刃脚高度，相关计算可参考文献[7]。

3 工程案例

根据对VSM竖井施工特点的总结以及其设计计算理论的初步研究，设计并实施了上海软土地区首个基于VSM工法的盾构竖井。竖井平面及剖面如图5~6所示。竖井内径为12 m，井壁采用预制混凝土管片结构，管片厚度为400 mm，每环管片高度为1.5 m，预制竖井总计25环，高度为37.5 m。

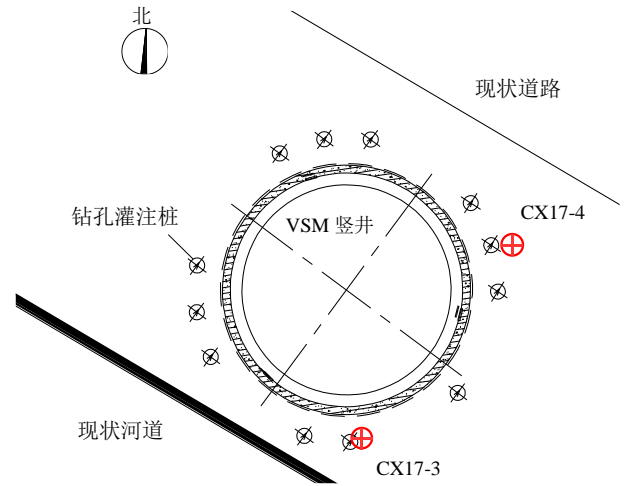


图5 竖井平面示意图

Fig. 5 Plan sketch of the VSM shaft

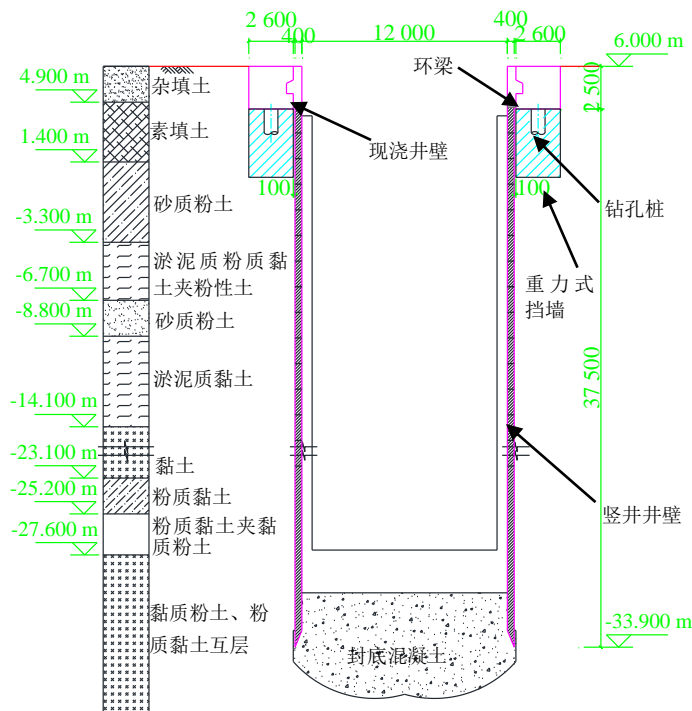


图6 竖井剖面示意图

Fig. 6 Profile of the VSM shaft

单位：mm

根据设计计算, 在封底阶段, 仅依靠封底混凝土、竖井的自重以及井壁摩擦不能满足抗浮要求。因此, 竖井上部设置 2.4 m 高的现浇段井壁与基础环梁连接。基础环梁截面高度为 2.5 m, 宽度为 2.6 m。通过环梁重量及环梁下的桩基满足抗浮要求。

环梁下设置 12 根直径为 800 mm 的钻孔灌注桩, 用于下沉阶段承受设备荷载及竖井自重荷载, 同时在抽水阶段提供抗拔力。桩基抗压时的承载力折减系数按 0.6 考虑。环梁下部土体还设置了 4 m 厚的高压旋喷桩重力式挡墙, 用于试掘进时的浅层土体支挡。

设计计算时, 对竖井下沉阶段的坑底抗隆起稳定性进行了验算。计算结果显示, 下沉至淤泥质黏土层时, 抗隆起安全系数最小, 约 1.52。该系数可以满足上海市基坑标准对三级基坑或重力式挡墙基坑的安全要求。而下沉到底时, 安全系数较高, 约 5.19。考虑到式 (1) 是基于大面积基坑推导的结果, 本竖井为圆形结构, 空间效应显著, 其实际安全系数应更高, 故认为抗隆起可以满足要求。

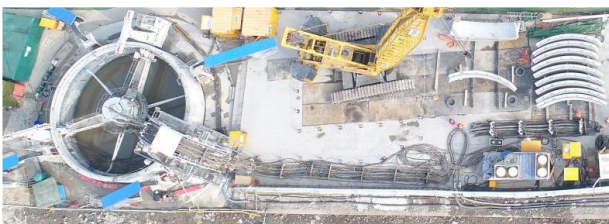
图 7 所示是竖井现场管片拼装下沉的情况。



(a) VSM 设备主机安装



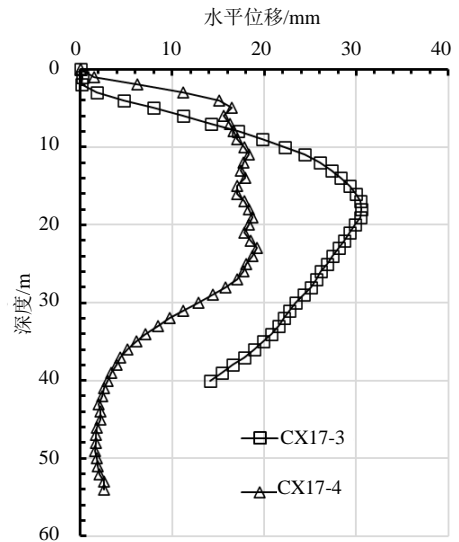
(b) VSM 竖井下沉中



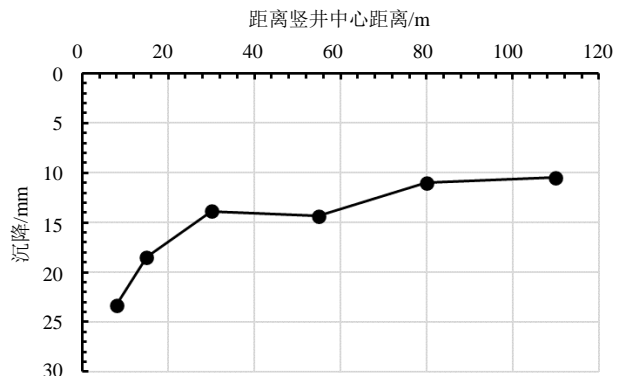
(c) VSM 施工场地航拍

图 7 VSM 竖井施工现场
Fig. 7 VSM shaft construction

该竖井于 2022 年 1 月初完成设备安装及调试, 1 月 14 日开始下沉掘进施工, 2022 年 2 月 10 日下沉到设计标高。实际下沉掘进施工阶段不到 1 个月。根据第三方监测结果, 截止竖井下沉到位时, 邻近井边缘的最大土体测斜值为 30.6 mm, 邻近竖井边缘的地表最大沉降约 23.3 mm, 如图 8 所示, 可满足上海市对环境保护等级为一级的基坑变形要求^[3]。图 8 (b) 中基坑沉降影响范围较大, 可能与远离竖井的测点位于行车道路上有关。



(a) 土体测斜



(b) 地面沉降

图 8 土体测斜及地面沉降

Fig. 8 Measured results of soil inclinometer and ground settlement

4 讨论

目前, VSM 在国外的一些竖井工程中有所应用, 在国内的首次应用则是在南京的某沉井式地下停车场项目中^[8]。根据这些已建项目显示, VSM 工法可适用于黏性土、砂土以及岩石地层等不同地质条件。通过本文工程实测显示, 该工法同样适用于软土地区。可见 VSM 工法的工艺适用性强。

相比于传统的沉井工法, VSM 工法具有更高

的施工效率,其自动化机械挖土、悬吊式下沉的特点使得VSM竖井下沉更为可控,解决沉井下沉突沉及倾斜问题。

相比于地下连续墙围护开挖的方式,VSM工法不需要设置超深地下连续墙围护结构以及水平支撑构件,其水下开挖的施工方式避免了地下水降水对环境的影响。对于深度大于25m的超深基坑,VSM工法经济性更好。仅从本文案例看,应用于软土地区时,VSM工法的环境影响小于传统沉井工法^[9],而略超过圆形地下连续墙围护的基坑^[10],但能够满足环境保护等级一级的基坑变形控制要求。当然,因本文案例尚属VSM工法在国内软土地区的首次应用,其环境影响机制还有待更深入研究。

5 结论与建议

根据下沉式竖井掘进工艺的特点,介绍了软土地区VSM竖井的主要设计内容,最后介绍了上海软土地区首个VSM竖井的主要设计参数以及施工监测结果。主要结论及建议如下:

(1) VSM竖井施工工法的特点是先超挖后下沉。竖井在下沉阶段完全通过下沉单元悬吊在开挖面以上,通过安装在竖井下部的VSM主机在水下实现竖井刃脚下及环向的土体开挖。

(2) 基于VSM竖井的施工特点,总结了软土地区VSM竖井设计主要内容。在上海等软土地区应用时建议验算抗隆起稳定性。

(3) 对上海软土地区某VSM竖井的施工过程进行了监测,结果表明该工法用于软土地区超深竖井施工可以取得良好效果。

(4) VSM工法在软土地区的应用还很少,施工对环境的影响机制还有待进一步研究。

参考文献

- [1] 卞超,冯旭海,王建平. VSM沉井下沉过程井壁受力规律研究[J]. 煤炭工程, 2021, 53(2): 41-47.
BIAN Chao, FENG Xu-hai, WANG Jian-ping. Variation of shaft wall force during the sinking of VSM caisson[J]. Coal Engineering, 2021, 53(2): 41-47.
- [2] 徐光亿,肖威,赵飞,等. 一种沉井潜入式竖井掘进机结构设计与研究[J]. 隧道建设(中英文), 2022, 42(1): 145-153.
XU Guang-yi, XIAO Wei, ZHAO Fei, et al. Structural design of a kind of caisson submerged shaft boring machine[J]. Tunnel Construction, 2022, 42(1): 145-153.
- [3] 上海市住房和城乡建设管理委员会. 基坑工程技术标准: DG/TJ 08—61—2018[S]. 上海: 同济大学出版社, 2018.
Shanghai Municipal Housing and Urban Rural Construction Management Committee. Technical Code for Excavation Engineering: DG/TJ 08—61—2018[S]. Shanghai: Tongji University Press, 2018.
- [4] 汪炳鉴,夏明耀. 地下连续墙的墙体内力及入土深度问题[J]. 岩土工程学报, 1983, 5(3): 103-114.
WANG Bing-jian, XIA Ming-yao. Embedment depth and internal force of diaphragm wall[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1983, 5(3): 103-114.
- [5] 王洪新. 考虑基坑形状和平面尺寸的抗隆起稳定安全系数及异形基坑的稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(12): 2559-2571.
WANG Hong-xin. A coefficient of heave-resistant stability considering shapes and plane sizes and its application to the stability analysis of shaped excavations[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(12): 2559-2571.
- [6] 宋二祥,付浩,李贤杰. 基坑坑底抗隆起稳定安全系数计算方法改进研究[J]. 土木工程学报, 2021, 54(3): 109-118.
SONG Er-xiang, FU Hao, LI Xian-jie. Improvement of calculation method for safety factor of basal heave stability of deep excavation[J]. China Civil Engineering Journal, 2021, 54(3): 109-118.
- [7] 中国工程建设标准化协会. 给水排水工程钢筋混凝土沉井结构设计规程: CECS 137: 2015[S]. 北京: 中国计划出版社, 2015.
China Association for Engineering Construction Standardization. Specification for Structural Design of Reinforced Concrete Sinking Well of Water Supply and Sewerage Engineering: CECS 137: 2015[S]. Beijing: China Planning Press, 2015.
- [8] 黄铭亮,张振光,徐杰,等. 基于VSM沉井施工过程的井壁受力实测研究: 以南京沉井式地下智能停车库工程为例[J]. 隧道建设(中英文), 2022, 42(6): 1033-1043.
HUANG Ming-liang, ZHANG Zhen-guang, XU Jie, et al. Measuring of shaft wall stress in caisson construction process based on vertical shaft sinking machine: a case

- study of caisson-type underground intelligent parking garage project in Nanjing, China[J]. Tunnel Construction, 2022, 42(6): 1033-1043.
- [9] 王海林, 彭芳乐, 徐正良, 等. 气压沉箱施工对周边地层环境影响的现场监测与数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(增刊 2): 3941-3951.
- WANG Hai-lin, PENG Fang-le, XU Zheng-liang, et al. Field measurement and numerical simulation of ground deformation induced by pneumatic caisson construction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(S2): 3941-3951.
- [10] 王卫东, 徐中华, 宗露丹, 等. 软土地区 56 m 深圆形基坑的优化设计与实践[J]. 建筑结构, 2022, 52(10): 1-10.
- WANG Wei-dong, XU Zhong-hua, ZONG Lu-dan, et al. Optimal design and practice of a 56 m ultra-deep circular excavation in soft soils[J]. Building Structure, 2022, 52(10): 1-10.

【简 讯】

《土力学及基础工程实用名词词典》（第二版）简介

《土力学及基础工程实用名词词典》（浙江大学出版社，1993）出版二十多年来得到了广大读者的欢迎。二十多年来我国土木工程建设快速发展，对外交流日益增多，不少设计、施工技术人员承担域外工程。近年来，不少读者希望词典能够再版。为了适应需要，我们在第一版的基础上组织编写了第二版。第二版对第一版收编的词条进行了修订、补充、完善，收编的汉语词条从 723 条扩展到 1106 条。

《土力学及基础工程实用名词词典》（第二版）收录了土力学及基础工程领域的常用词条和相应的英文词条。词条释文力求正确、简明、全面，并尽可能包括设计、施工所需资料。词条索引共有 3 种：（1）词条分类检字索引；（2）词条拼音检字索引；（3）词条英文检字索引。查阅方便。

《土力学及基础工程实用名词词典》（第二版）内容分 30 个部分，分别为：（1）综合类；（2）工程地质及勘查；（3）岩土分类；（4）室内试验；（5）原位测试；（6）土的物理性质；（7）渗透性和渗流；（8）应力；（9）位移和变形；（10）

固结；（11）抗剪强度；（12）本构模型；（13）岩土动力性质；（14）地基承载力；（15）地基处理；（16）浅基础；（17）复合地基；（18）桩基础；（19）特种基础；（20）土坡稳定；（21）挡土结构和喷锚结构；（22）堤与坝；（23）土压力；（24）基坑工程与降水；（25）地下工程；（26）动力机器基础；（27）地基基础抗震；（28）土工合成材料；（29）环境岩土工程；（30）其他。

《土力学及基础工程实用名词词典》（第二版）主编龚晓南，副主编谢康和。罗勇博士、连峰博士、李瑛博士、王志达博士、沈扬博士、郭彪博士、吕文志博士、张杰博士、陈东霞博士、史海莹博士、张磊博士、张雪婵博士、黄大中博士等在浙江大学学习期间参与了本词典词条的遴选、编写和校对工作。本词典在编写过程中还得到了浙江大学滨海和城市岩土工程研究中心同事们的大力支持，陆水琴和王笑笑等同志为本词典的排版、校对等做了许多工作，在此谨表谢意。

由于编者水平有限，本词典中难免有错误和不当之处，敬请读者批评指正。