

文章编号: 1005-0523(2021)05-0023-07



某超深圆形基坑受力变形的尺寸效应分析

赵一行¹, 詹刚毅², 石钰锋¹, 梁新欢³, 蒋亚龙^{1,3}, 祝耀东⁴

(1.华东交通大学江西省岩土工程基础设施安全与控制重点实验室,江西 南昌 330013;2.南昌铁路勘测设计院有限责任公司,江西 南昌 330001;3.南昌轨道交通集团有限公司,江西 南昌 330199;4.南昌市政公用工程项目管理有限公司,江西 南昌 330025)

摘要:以佛山市某超深工作井基坑为依托,采用数值模拟方法,分析不同基坑尺寸对地下连续墙水平位移、弯矩、墙后地表沉降、坑底隆起的影响,并通过现场监测结果验证了数值分析的可靠度。基于此,进一步研究了尺寸效应对圆形基坑拱效应特点的影响。研究表明:地下连续墙水平位移、弯矩、墙后地表沉降、坑底隆起均表现随基坑尺寸增大而增大的整体趋势,当基坑直径小于65.9 m时,对各参数影响较大,反之较小。且当基坑直径约为0.6~0.9倍基坑开挖深度时,围护结构环向应力大于径向应力,具有较好的“拱效应”;当基坑直径超出该范围,环向应力小于径向应力,“拱效应”减弱。通过对某超深圆形基坑尺寸的研究,以期对相关工程提供参考。

关键词:超深圆形基坑;尺寸效应;数值计算;变形分析;拱效应

中图分类号:TU94

文献标志码:A

本文引用格式:赵一行,詹刚毅,石钰锋,等.某超深圆形基坑受力变形的尺寸效应分析[J].华东交通大学学报,2021,38(5):23-29.

DOI:10.16749/j.cnki.jecjtu.20211026.010

Analysis of the Size Effect of a Ultra-Deep Circular Foundation Pit Under Stress and Deformation

Zhao Yixing¹, Zhan Gangyi², Shi Yufeng¹, Liang Xinhuan³, Jiang Yalong^{1,3}, Zhu Yaodong⁴

(1. Jiangxi Key Laboratory of Geotechnical Engineering Infrastructure Safety and Control, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 2. Nanchang Railway Survey and Design Institute Co., Ltd., Nanchang 330001, China; 3. Nanchang Urban Rail Group Co., Ltd., Nanchang 330199, China; 4. Nanchang Municipal Public Engineering Project Management Co., Ltd., Nanchang, 330025, China)

Abstract: Focusing on the foundation pit of an ultra-deep working well in Foshan City, numerical simulation methods are used to analyze the influence of different foundation pit sizes on the horizontal displacement, bending moment, surface settlement behind the wall, and pit bottom uplift of the diaphragm wall, and the reliability of numerical analysis is verified by on-site monitoring results. The influence of the size effect on the arch effect characteristics of the circular foundation pit is further studied. It is found that the horizontal displacement, bending moment, surface settlement behind the wall, and pit bottom uplift of the diaphragm wall show an overall trend of increasing with the increase of the size of the foundation pit. When the diameter of the foundation pit is less than 65.9 m, it has a greater impact on various parameters. And when the diameter of the foundation pit is about 0.6~0.9 times of the excavation depth of the foundation pit, the circumferential stress of the retaining structure is greater than the radial stress, which has a good "arch effect"; when the diameter of the foundation pit exceeds this range, the hoop stress is smaller than the radial stress, and the "arch effect" is weakened. Through the study of the size of an ultra-deep circular foundation pit, it is expected to provide reference for related projects.

Key words: ultra-deep circular foundation pit; size effect; numerical calculation; deformation analysis; arch effect

收稿日期:2021-08-15

基金项目:国家地区科学基金项目(51768020,51768021)

Citation format: ZHAO Y X, ZHAN G Y, SHI Y F, et al. Analysis of the size effect of a ultra-deep circular foundation pit under stress and deformation[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2021, 38(5): 23-29.

随着我国城市建设迅猛发展,地下空间利用率越来越大,基坑开挖尺寸也随之增大。长期的工程实践表明,其他条件相同时,越宽大的基坑稳定性越差,变形也较为明显^[1]。因此,针对基坑的尺寸效应,许多学者进行了相关性研究。

王洪新^[2-3]在以往基坑设计主流方法基础上,提出考虑尺寸效应的基坑稳定性安全系数计算方法;王明年等^[4]通过上限法原理,提出考虑基坑几何尺寸的抗隆起安全系数计算方法;何超等^[5]通过对基坑坑底隆起特性及形成机理进行分析,提出考虑坑底隆起宽度效应的基坑分类方法;黄传胜,方金霞,付立彬,徐中华,王卫东等^[6-10]以实际工程为依托,通过数值模拟方法,研究了尺寸效应改变对围护结构受力变形的影响;陆培毅,王飞等^[11-12],通过数值模拟方法,分析尺寸效应对双排桩支护结构的变形影响规律;项龙江等^[13]采用理论计算和数值模拟相结合的手段,分析尺寸效应对基坑土压力和变形的影响。

通过对超深圆形基坑实际工程案例进行调研后发现,施工中基坑开挖深度越来越大^[14-15],最大深度接近 50 m^[16]。然而,对于开挖深度 60 m 以上,且平面形状为圆形的基坑相对较少。对该类工程的研究,可为相关实际工程提供参考,具有一定的实际意义。

以佛山市某超深圆形工作井基坑为依托,基于 Midas GTS/NX 有限元软件,对不同尺寸影响下围护结构进行分析,探讨其受力变形规律,并与现场实测数据进行比较,验证其合理性。并进一步探讨尺寸效应对圆形基坑拱效应的影响,以期类似圆形基坑工程提供参考。

1 工程背景

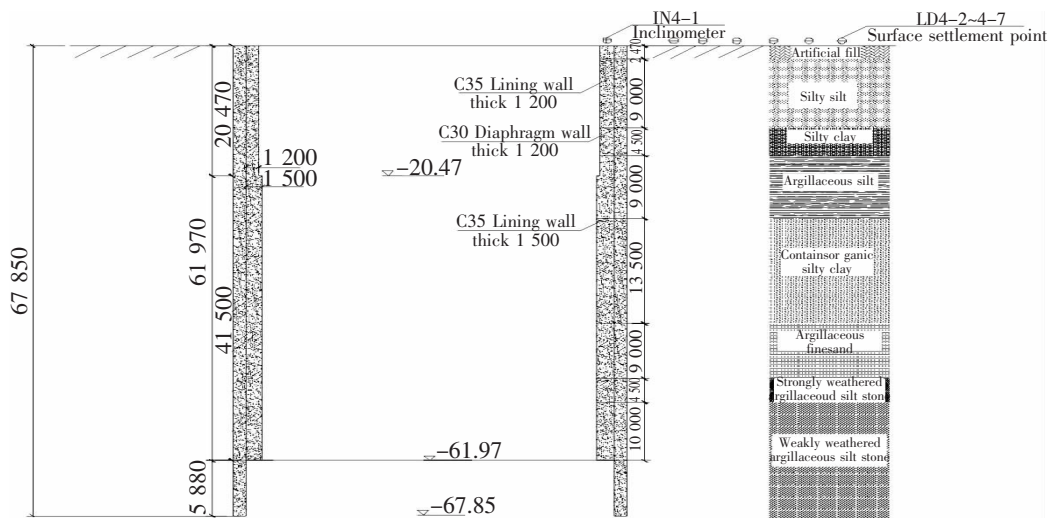
1.1 工程概况

圆形工作井外径为 35.9 m,内径 30.5~31.1 m,开挖深度 61.97 m,共分 13 层开挖,分别为 2.47 m, 2 至 12 层各开挖 4.5 m, 10 m,采用地下连续墙围护+钢筋混凝土内衬墙支护,逆作法施工。地连墙采用 C30 混凝土,厚 1.2 m,嵌固深度 5.88 m;内衬墙采用 C35 混凝土,厚 1.2~1.5 m。基坑支护剖面如图 1 所示。

1.2 工程地质条件及监测点位布置

场地地层分布从上至下依次为:人工填土,淤泥质细砂,淤泥质黏土,泥质粉细砂,含有有机质粉质黏土,泥质细砂,强风化泥质粉砂岩,弱风化泥质粉砂岩。

基坑开挖施工过程中,主要监测内容如下:①地连墙墙顶水平位移监测;②地连墙墙顶竖向位移监测;③地连墙深层水平位移监测;④地表沉降监测;⑤坑底隆起监测。监测点位布置如图 1 所示。



(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

图 1 基坑支护剖面图(单位:mm)

Fig.1 Sectional view of foundation pit support(Unit:mm)

2 模型合理性验证

2.1 模型建立

为消除不同尺寸下边界效应的影响,且考虑到基坑开挖深度对周边土体的影响,采用 Midas GTS/NX 建立如下三维模型:尺寸定为 400 m×400 m×

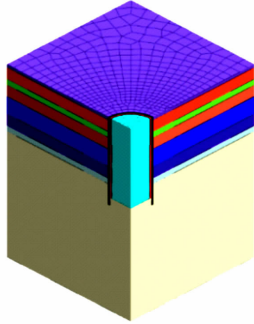


图 2 局部有限元模型
Fig.2 Local finite element model

150 m(长、宽、高),不考虑水的渗流影响。考虑到圆形基坑的中心对称效果,且便于查看内部围护结构,局部模型取整体模型的 1/16,如图 2 所示。各侧边界进行水平约束,顶部为自由面,底面为固定节点的三向约束,采用激活与钝化对基坑开挖施工工序进行模拟。

2.2 本构的选取及相关参数

土体模型采用摩尔-库伦本构,地连墙、内衬墙采用线弹性本构,相关参数见表 1,表 2。

表 1 围护结构参数表
Tab.1 Enclosure structure parameter

Enclosure	Severe $/(kN \cdot m^{-3})$	Elastic Modulus/GPa	Poisson ratio
Ground wall	24	30	0.2
Lining wall	24	31.5	0.2

表 2 土层物理力学参数表

Tab.2 Physical and mechanical parameters of soil layer

Soil layer	Layer thickness /m	Severe $/(kN \cdot m^{-3})$	Cohesion /kPa	Internal friction angle/ $^{\circ}$	Compression modulus/MPa	Poisson ratio
Artificial fill	2.47	18.2	8	11	4.25	0.3
Silty silt	9	18.5	8	23	5.71	0.33
Silty clay	4.5	17.6	6	7	3.16	0.32
Argillaceous silt	9	19	5	23	4.92	0.3
Contains organic silty clay	13.5	17.8	11	12	4	0.3
Argillaceous fine sand	9	20.1	5	23	6.01	0.3
Strongly weathered argillaceous siltstone	4.5	21	50	26	-	0.27
Weakly weathered argillaceous siltstone	>25	23	300	30	-	0.22

2.3 模拟工序

- 1) 首先对土体进行初始地应力平衡并位移清零;
- 2) 进行地连墙施工并施加堆载,位移清零;
- 3) 开挖至 2.47 m 处,施做第一层内衬墙;
- 4) 开挖至 6.97 m 处,施做第二层内衬墙;
- 5) 逐层开挖至基坑底部,逐层施做内衬墙。

2.4 工况拟定

以基坑直径为自变量,变化范围从 35.9~105.9 m,共计 8 个工况。其中, $D=35.9$ m 为设计工况。探讨相同条件下,地连墙水平位移、弯矩,墙后地表沉降,坑底隆起随基坑直径的变化规律。

3 计算结果分析

3.1 墙体水平位移分析

图 3 为不同尺寸影响下墙体水平位移变化曲

线图。

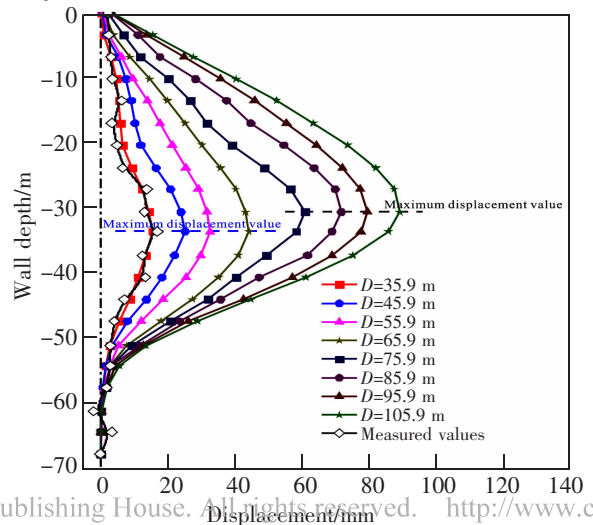


图 3 墙体水平位移图
Fig.3 Horizontal displacement of the wall

从图3可知,地连墙水平位移实测最大值为1681 mm,位于埋深33 m处;计算最大值为1530 mm,位于埋深33.93 m处。且总体分布规律上,模拟值与实测值符合较好。随深度的增加,墙体水平位移逐渐增大,整体趋势表现为“弓形”。

随着尺寸的增加,墙体水平位移最大值逐渐增大。当直径小于75.9 m时,最大位移值增加量逐渐增大,当直径大于75.9 m时,最大位移增加量逐渐减小,整体呈现先增加后减小的趋势。当直径小于65.9 m时,水平位移最大值位于深度约33.64 m处,为基坑开挖深度中部靠下位置,约0.54 H(H为基坑开挖深度);当直径大于65.9 m时,水平位移最大值上移至深度约30.65 m处,为基坑开挖深度中部靠上位置,约0.49 H。

3.2 墙体弯矩分析

图4为不同尺寸影响下墙体弯矩变化曲线图。

从图4可知,弯矩值沿负向增大至深度13.57 m处,产生第一个反弯点。而后沿正向增大至深度20.36 m时,发生反弯。该点为不同厚度内衬墙上下交接点,受不同厚度内衬墙刚度影响,产生反弯。至深度33.93 m处,发生反弯,并达到最大负弯矩值。该点为侧向变形最大值处,造成较大的弯矩出现。由于下部弱风化岩的物理力学性质及嵌固作用,弯矩值沿正向增大至深度54.29 m处,发生反弯。随着深度的继续增加,弯矩值逐渐减小。

随着尺寸的增加,最大弯矩值逐渐增大,最大

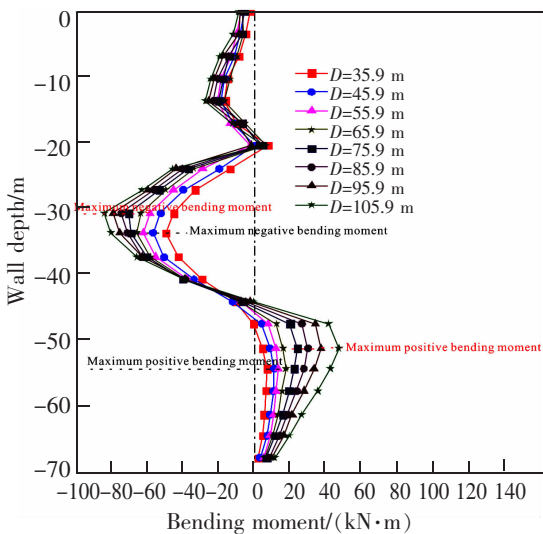


图4 墙体弯矩图

Fig.4 Wall bending moment diagram

弯矩增加量整体变化不大。当直径增大至65.9 m时,最大负弯矩位于深度约33.93 m处、最大正弯矩位于深度约54.29 m;当直径大于65.9 m时,最大负弯矩、最大正弯矩均上移,位于深度约51.21 m处。

3.3 墙后地表沉降分析

图5为不同尺寸影响下墙后地表沉降变化曲线图。便于图形直观表达,仅取沉降较敏感区域。

从图中可知,随着距基坑边缘距离的增加,沉降值整体呈“勺型”分布,最大值均位于墙后10~12 m范围内,约为16.14%~19.36%的基坑开挖深度。距基坑边缘40 m范围内,沉降值变化较大,为沉降敏感区域;40 m后,沉降值变化较小,且随着坑边距离的继续增加,产生微小的隆起现象。

随尺寸增加至直径65.9 m时,不同直径间最大沉降值增幅较大,均大于40%;当直径从65.9 m增大至105.9 m时,最大沉降值相比增幅有所减小,约为10%~40%之间。表明当直径不超过65.9 m时,墙后地表沉降值受基坑直径影响较大;反之,影响较小。且当直径超过65.9 m时,墙后地表最大沉降值已超过规范要求控制值。

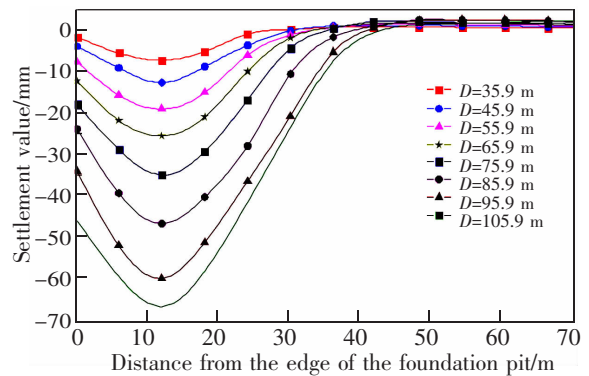


图5 墙后地表沉降图

Fig.5 Ground settlement diagram behind the wall

3.4 坑底隆起分析

图6为不同尺寸影响下坑底隆起变化曲线图。

从图6可知,随着距基坑中心距离与基坑直径二者比值R的增加,隆起值逐渐减少,最大隆起值均位于基坑中心处。

随尺寸增加至直径65.9 m时,最大隆起值平均增幅大于20%;当直径从65.9 m增大至105.9 m时,最大隆起值相比平均增幅较小,约为10%以内。表明当直径不超过65.9 m时,基坑底部隆起值受基坑直径影响较大;反之,影响较小。

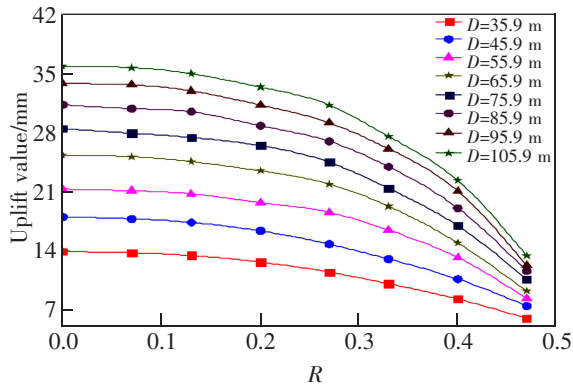


图 6 坑底隆起图
Fig.6 Uplift of the bottom of the pit

4 拱效应影响分析

与常规形状基坑不同,圆形基坑从结构上可以看作闭合的拱,可充分利用土的拱效应,可将作用在其上面的荷载基本上转化为地下连续墙的环向压力,可充分发挥混凝土抗压性能好的特点,有利于控制基坑变形^[7]。且圆形基坑是以承受环向轴压为主^[8],故以环向应力、径向应力为指标,表示不同尺寸下拱效应效果。

图 7 为不同尺寸下,环向应力、径向应力最大值曲线图。从图中可知,随基坑尺寸的增加,环向应力最大值、径向应力最大值持续增大。当直径小于 55.9 m 时,环向应力最大值大于径向应力最大值;反之,小于径向应力最大值。

综上所述,直径小于 55.9 m 时,环向应力大于径向应力,具有较好的“拱效应”,有利于提高基坑的稳定性;当直径大于 55.9 m,环向应力最大值小于径向应力最大值,“拱效应”减弱。且通过前文对其变形分析可知,当直径超过 65.9 m 时,变形超过

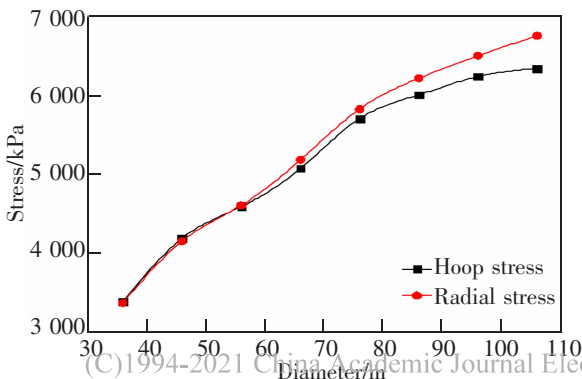


图 7 不同尺寸下应力最大值图

Fig.7 The maximum stress diagram under different sizes

规范控制值^[19-20]要求。综合判断该依托工程圆形基坑直径在 35.9~55.9 m 范围内为宜,并采用强度折减法^[21]计算所得稳定性安全系数为 6,符合相应规范要求。

5 结论

1) 地下连续墙水平位移、弯矩,墙后地表沉降,坑底隆起均表现随基坑尺寸的增大而增大的整体趋势,其中:① 地下连续墙水平位移在直径 75.9 m 范围内受影响较大;② 地下连续墙弯矩受基坑尺寸影响较小;③ 墙后地表沉降在直径 65.9 m 范围内受影响较大;④ 坑底隆起在直径 65.9 m 范围内受影响较大。

2) 当基坑直径小于 55.9 m 时,围护结构环向应力大于径向应力,具有较好的“拱效应”;当基坑直径大于 55.9 m 时,环向应力小于径向应力,“拱效应”逐渐减弱。

3) 综合判断该依托工程圆形基坑直径在 35.9~55.9 m 范围内为宜,大小约为 0.6~0.9 倍基坑开挖深度,以期为类似圆形基坑工程提供参考。

参考文献:

[1] 王洪新. 考虑二维和三维尺寸效应的基坑抗隆起稳定安全系数[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(11): 2144-2152.
WANG H X. Safety factor of foundation pit anti-heave stability considering two-dimensional and three-dimensional size effects[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(11): 2144-2152.

[2] 王洪新,周松. 基坑设计的杆系—荷载—弹簧模型荷载取值及变形和稳定性分析的若干问题 and 研究建议[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(11): 2349-2358.
WANG H X, ZHOU S. Several problems and research suggestions on the load value, deformation and stability analysis of the rod-load-spring model of foundation pit design[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(11): 2349-2358.

[3] 王洪新. 基坑的尺寸效应及考虑开挖宽度的抗隆起稳定安全系数计算方法[J]. 岩土力学, 2016, 37(S2): 433-441.
WANG H X. The size effect of the foundation pit and the calculation method of the anti-heave stability safety factor considering the excavation width[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(S2): 433-441.

[4] 王明年,曾正强,刘大刚,等. 连续变形场下的窄基坑抗隆

- 起失稳上限解[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版),2020,39(3):44-50.
- WANG M N,ZENG Z Q,LIU D G,et al. Upper limit solution of uplift-resistant instability of narrow foundation pit under continuous deformation field[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University(Natural Science Edition),2020,39(3):44-50.
- [5] 何超,陈沛,周顺华. 软土基坑宽度效应对坑底隆起的影响[J]. 华东交通大学学报,2015,32(6):82-87.
- HE C,CHEN P,ZHOU S H. The influence of the width effect of the soft soil foundation pit on the uplift of the bottom of the pit [J]. Journal of East China Jiaotong University,2015,32(6):82-87.
- [6] 黄传胜,张家生. 地铁深基坑三维有限元模型尺寸效应分析[J]. 铁道科学与工程学报,2011,8(2):59-63.
- HUANG C S,ZHANG J S. Analysis of size effect of three-dimensional finite element model of subway deep foundation pit[J]. Journal of Railway Science and Engineering,2011,8(2):59-63.
- [7] 方金霞,汪鹏程,杨永威. 基坑尺寸及形状效应的三维有限元分析[J]. 安徽建筑工业学院学报(自然科学版),2012,20(6):15-18.
- FANG J X,WANG P C,YANG Y W. Three-dimensional finite element analysis of foundation pit size and shape effect[J]. Journal of Anhui Institute of Architecture and Industry(Natural Science Edition),2012,20(6):15-18.
- [8] 付立彬,宋梦. 空间效应对基坑开挖围护结构变形的影响[J]. 地下空间与工程学报,2015,11(6):1596-1602.
- FU L B,SONG M. The influence of spatial effect on the deformation of the retaining structure of foundation pit excavation[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering,2015,11(6):1596-1602.
- [9] 徐中华. 上海地区支护结构与主体地下结构相结合的深基坑变形性状研究[D]. 上海:上海交通大学,2007.
- XU Z H. Research on deformation behavior of deep foundation pit combining supporting structure and main underground structure in shanghai[D]. Shanghai:Shanghai Jiaotong University,2007.
- [10] 王卫东,朱伟林,陈峥,等. 上海世博 500 kV 地下变电站超深基坑工程的设计、研究与实践[J]. 岩土工程学报,2008,30(S1):564-576.
- WANG W D,ZHU W L,CHEN Z,et al. Design,research and practice of ultra-deep foundation pit engineering of Shanghai World Expo 500 kV underground substation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2008,30(S1):564-576.
- [11] 陆培毅,杨靖,韩丽君. 双排桩尺寸效应的有限元分析[J]. 天津大学学报,2006(8):963-967.
- LU P Y,YANG J,HAN L J. Finite element analysis of the size effect of double-row piles[J]. Journal of Tianjin University,2006(8):963-967.
- [12] 王飞,刘亚文,梁进军,等. 深基坑拉锚式双排桩支护结构变形与土压力研究[J]. 建筑科学,2016,32(5):113-120.
- WANG F,LIU Y W,LIANG J J,et al. Research on deformation and earth pressure of anchored double-row pile supporting structure in deep foundation pit[J]. Building Science,2016,32(5):113-120.
- [13] 项龙江,龙照,时轶磊,等. 考虑尺寸效应的小尺寸深基坑土压力与变形计算分析[J]. 科学技术与工程,2020,20(34):14178-14184.
- Xiang Longjiang,Long Zhao,Shi Yilei et al. Calculation and analysis of earth pressure and deformation of small-size deep foundation pits considering size effect[J]. Science Technology and Engineering,2020,20(34):14178-14184.
- [14] 贺炜,凡子义,崔剑峰,等. 坭洲水道桥圆形地连墙支护体系监测与分析[J]. 地下空间与工程学报,2019,15(2):549-555.
- HE W,FAN Z Y,CUI J F,et al. Monitoring and analysis of the circular ground wall supporting system of nizhou waterway bridge[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering,2019,15(2):549-555.
- [15] 刘波. “上海中心”塔楼深大圆形基坑性状的实测分析[J]. 地下空间与工程学报,2018,14(S1):299-307.
- LIU B. Actual measurement analysis of the properties of the deep and large circular foundation pit of the “Shanghai Center” tower[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering,2018,14(S1):299-307.
- [16] 沈浩,邹丽敏,王碧波. 超深圆形基坑地下连续墙成槽垂直度控制施工措施[J]. 中国给水排水,2020,36(6):83-87.
- SHEN H,ZOU L M,WANG B B. Construction measures to control the verticality of the grooves of the underground diaphragm wall of the ultra-deep circular foundation pit[J]. China Water & Wastewater,2020,36(6):83-87.
- [17] 刘国彬,王卫东. 基坑工程手册[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2009.
- LIU G B,WANG W D. Handbook of Foundation Pit Engineering[M]. Beijing:China Construction Industry Press,2009.
- [18] 董新平,郭庆海,周顺华. 圆形基坑的变形特点及主要影响因素分析[J]. 地下空间与工程学报,2005(2):196-199.
- DONG X P,GUO Q H,ZHOU S H. Analysis of deformation characteristics and main influencing factors of round

foundation pit[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2005(2):196-199.

- [19] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑基坑工程监测技术规范:GB 50497-2019 [S]. 北京:中国计划出版社, 2019.

Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical code for monitoring of building foundation pit engineering:GB 50497-2019 [S]. Beijing:China Planning Press, 2019.

- [20] 龚亮, 靳建军, 陈胜, 等. 深埋隧道圆形基坑围护结构变形特性及控制指标探讨[J]. 防灾减灾工程学报, 2019, 39(2):316-322.

GONG L, JIN J J, CHEN S, et al. Discussion on deformation characteristics and control indexes of circular foundation pit retaining structure of deep buried tunnel[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2019, 39(2):316-322.

- [21] 王卫东, 徐中华. 基于强度折减法的圆形深基坑坑底抗隆起稳定性分析[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(5):195-201.
WANG W D, XU Z H. Analysis of anti-heave stability of circular deep foundation pit bottom based on strength reduction method[J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(5):195-201.



第一作者:赵一行(1996—),男,硕士研究生,研究方向为隧道与地下工程研究。E-mail:494840570@qq.com。



通信作者:詹刚毅(1984—),男,高级工程师,获省级优秀设计一等奖1项、获省级科技进步奖2项,研究方向为大跨度组合结构桥梁设计与施工控制。E-mail:civil_zgy@vip.163.com。

(责任编辑:姜红贵)