

DOI: 10.11779/CJGE2024S20012

基于离心机和数值模拟的深基坑开挖支护结构受力和变形研究

孙 慧¹, 李从安¹, 李 波¹, 王志鹏²

(1. 长江科学院水利部岩土力学与工程重点实验室, 湖北 武汉 430010; 2. 中国市政工程西北设计研究院有限公司深圳分公司, 广东 深圳 518000)

摘要: 依据实际基坑开挖和支护结构工程特性进行模型概化, 得出适合的离心模型试验方案, 采用离心模型试验分析超深基坑开挖过程支护结构工程的受力和变形分布规律特征。同时建立三维有限元模型对圆形基坑开挖过程中支护结构的变形进行数值模拟, 并将试验和数值计算结果进行对比分析。结果表明: 支护结构水平位移模式为两头小, 中间大的“涨肚型变形”; 并且随着基坑深度的加深, 地下连续墙水平位移最大值点逐渐下移; 地表沉降呈凹槽形沉降形式, 随着开挖的进行, 沉降槽底部向着远离基坑的方向发展; 地连墙背后土压力变化值呈非线性, 开挖初期, 土压力沿深度变化很小, 但随着开挖的进行, 土压力变化量逐渐增大; 数值分析与离心模型试验的开挖支护结构变形特征结果较相近。研究成果可为基坑开挖设计切实有效的支护结构提供科学依据。

关键词: 深基坑; 开挖; 支护结构; 变形; 离心机; 数值模拟

中图分类号: TU411 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2024)S2-0114-05

作者简介: 孙 慧(1980—), 女, 博士, 高级工程师, 主要从事岩土工程方面的研究。E-mail: sunhui_hust@126.com。

Stresses and deformations of support structures of deep foundation pit based on centrifuge and numerical simulation

SUN Hui¹, LI Congan¹, LI Bo¹, WANG Zhipeng²

(1.Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Engineering of Ministry of Water Resources, Chang Jiang River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China; 2. China Municipal Engineering Northwest Design and Research Institute Co., Ltd. Shenzhen Branch, Shenzhen 518000, China)

Abstract: Based on the actual characteristics of excavation and support structures of foundation pit, a suitable centrifugal model test scheme is obtained, and the centrifugal model test is used to analyze the distribution characteristics of stress and deformation of the support structures of the ultra-deep foundation pit during the excavation process. Simultaneously a three-dimensional finite element model is established to simulate the deformation of the support structures during the excavation process of a circular foundation pit, and the test and numerical results are compared and analyzed. The results show that the horizontal displacement mode of the support structures is the "bulge shaped deformation" with small ends and large middle. As the depth of the foundation pit increases, the point with the maximum horizontal displacement of the underground diaphragm wall gradually moves downwards. The surface settlement is in the form of grooves, and as excavation continues, the bottom of the settlement groove develops towards the direction away from the foundation pit. The variation of soil pressure behind the diaphragm wall is non-linear. At the early stage of excavation, the variation of soil pressure along depth is small, but as excavation continues, the variation of soil pressure gradually increases. As the excavation continues, the bending moment value gradually increases, reaching the maximum positive bending moment near the depth of 17 m, about 2200 kN·m/m. The deformation characteristics of the support structures obtained from the numerical analysis and centrifugal model tests are relatively similar. The research results contribute to providing scientific basis for proposing practical and effective protection measures of the support structures for excavation of foundation pits.

Key words: deep foundation pit; excavation; support structure; deformation; centrifuge; numerical simulation

基金项目: 国家自然科学基金项目(52208329); 安徽省引江济淮集团有限公司科技项目(YJJH-ZT-ZX-20230118528, YJJH-ZT-ZX20191031216); 中央级公益性科研院所基本科研业务费项目(CKSF2023327/YT)
收稿日期: 2024-06-21

0 引言

随着中国城市建设的发展,地面交通枢纽不能满足人们日益增长的生活需求,地下空间开发利用越来越广泛,深基坑以及超深基坑不断涌现,但超深基坑的基础理论研究相对薄弱,已经严重落后于实践。开挖过程中土压力的分布以及围护结构的变形形式的不确定性为基坑的设计与施工带来了巨大的挑战^[1]。

采用物理模拟试验研究基坑开挖过程支护结构受力和变形分布规律是比较常用的手段。基于离心模型试验技术^[2-7],许多学者依托现场基坑工程从开挖和支持模型系统的稳定性、受力和变形等方面开展了较深入的研究。在数值模拟方面,鲁泰山等^[8]采用 SCPTU 测试方法确定的参数对基坑开挖引起的地下连续墙水平位移及坑侧地表沉降进行了模拟;张鹏等^[9]运用 Midas GTS 对某深基坑开挖过程进行模拟,并结合已有资料进行了分析。但是将离心模型试验结果与数值模拟计算进行分析比较的工作相对较少。因此,有必要对深基坑开挖时的围护结构受力和变形特征开展数值模拟分析和模型试验研究,以期指导工程设计和建设。

本文以某深大圆形基坑的工程实例为依托,采用离心和数值模拟技术开展了深基坑开挖过程中支护结构受力和变形特征分析研究。

1 基坑开挖离心试验

1.1 相似比设计

准确的相似比设计是离心模型试验成功模拟原形的关键。确定离心模型试验相似比的基本原则是保证模型与原型应力的相似^[10]。密度为 ρ 的土体在 N 倍重力的离心力作用下,模型 h_m 深度处的土体竖向应力 σ_{vm} 为

$$\sigma_{vm} = \rho N g h_m \quad (1)$$

原型深度 h_p 处的土体竖向应力 σ_{vp} 为

$$\sigma_{vp} = \rho g h_p \quad (2)$$

离心模型试验的目的就是使得模型深度 h_m 处的竖向应力与原型深度 h_p 处的竖向应力相等,即 $\sigma_{vm}=\sigma_{vp}$,所以 $h_m=h_p/N$,那么模型与原型的线性比尺即为 $1/N$ 。因为试验中位移与模型几何尺寸的量纲是相同的,因此模型与原形的位移的比尺也为 $1/N$ 。由于应变是无量纲量,所以应变的比尺为 $1:1$ 。即模型土体与原型的应力应变关系相同。

1.2 模型试验材料

基坑土层概化为 4 层,根据土层的压缩模量及强度相似准则,分别选择中砂、粉质黏土、粗砂和岩石

相似材料进行模拟。

1.3 模型试验监测系统

圆形基坑试验监测布置如图 1 所示,主要包括 5 个激光位移传感器、6 个土压力盒、14 个应变。采用激光位移传感器,沿基坑外侧地基表面布置 4 个监测点;沿地连墙一侧的侧壁边土体内布设 6 个土压力传感器,同时在地下连续墙另一侧墙体上沿深度布置 8 个应变片,得到地下连续墙墙身的变形和受力。

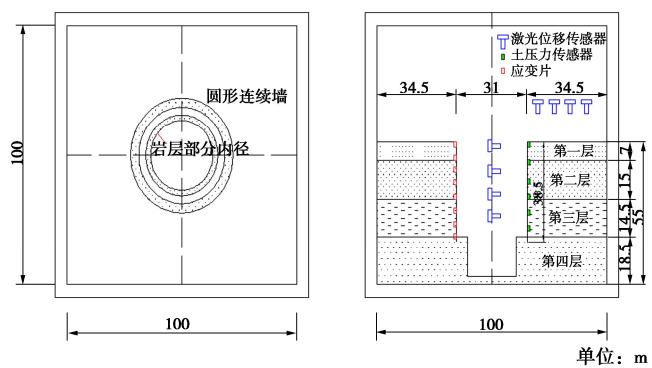


图 1 圆形基坑离心模型和监测布置

Fig. 1 Centrifugal model for circular foundation pit and monitoring layout

1.4 试验过程

试验采用停机—开挖—支护—再运行的方式,最大加速度为 $100g$ 。试验过程设计如下:①地基固结,将装备好的模型装上离心机后,逐级提升加速度,分别在 $20g$, $40g$, $60g$, $80g$ 稳定运行 7 min, 最后在 $100g$ 稳定运行 20 min, 待地基和地连墙变形稳定后停机;②离心机运行 5 次,针对第 1~第 5 层进行地基开挖,运行加速度至 $100g$;③基岩开挖,运行离心机。

2 基坑开挖数值模拟

2.1 模型介绍

圆形基坑开挖直径为 31 m,最终开挖深度均为 52.3 m。对于模型范围的选取,拟定: X 方向(即基坑长边方向)边界取(-70 m, 70 m); Y 方向(即基坑短边方向)边界取(-70 m, 70 m);基坑的下部已经嵌入弱风化混合花岗岩,因此基坑下部考虑的范围可以适当减小,取深度范围为 80 m。对土层参数然后再进行开挖支护。圆形闸门井支护共有九道支撑,第 1 道支撑位于高程为 4.5 m,第 2 道支撑位于高程为 0.5 m,第 3 道支撑位于高程为 -3.5 m,第 4 道支撑位于高程为 -7.5 m,第 5 道支撑位于高程为 -11.5 m,第 6 道支撑位于高程为 -15.5 m,第 7 道支撑位于高程为 -19.5 m,第 8 道支撑位于高程为 -23.5 m,第 9 道支撑位于高程为 -27.5 m,圆形闸门井底部位于高程 -47.3 m,

闸门井为混凝土结构。

沿深度变化不大且土层厚度较小的两层或多层土可并为一层，在具体的建模时，考虑到计算时间等因素，沿深度变化不大且土层厚度较小的两层或多层土需要进一步合并。基坑开挖前将地表清平至绝对高程 +5.00 m。

2.2 计算方法

在数值模拟计算中，土的塑性模型选取 Mohr-coulomb 模型，屈服准则参数按照地质报告所给参数选取，地下连续墙混凝土结构、支撑以及冠梁视为线弹性材料采用弹性模型。

2.3 网格划分

三维数值模型中土体采用实体单元建立，如图 2 (a) 所示，地下连续墙采用二维板单元，如图 2 (b) 所示，支撑及冠梁通过梁单元建立，如图 2 (c) 所示。使用梁单元建立支撑的优点是可以在计算结束之后得到结构的内力情况。土层及结构构件网格划分如图 3 所示。圆形闸门井单元数量 45678，节点数量 17845。

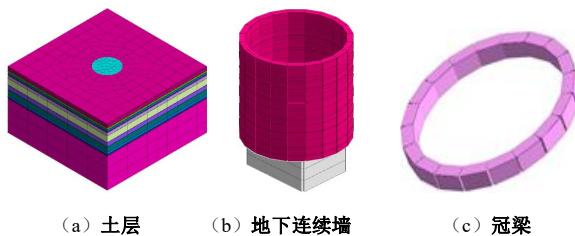


图 2 圆形闸门井基坑网格划分

Fig. 2 Grid division of circular foundation pit with gate well

3 离心试验与数值模拟结果分析

3.1 离心试验结果分析

图 3 为圆形基坑开挖过程中地下连续墙侧向变形。分析表明：圆形地下连续墙的变形模式为两头小，中间大的“涨肚型变形”，并且随着基坑深度的加深，地下连续墙水平位移最大值点逐渐下移；开挖第 3 步后最大值点移动较小，变化速率随着开挖的进行而减小，有稳定收敛的趋势；第 5 步开挖后地连墙水平位移达到最大值 12.3 mm，为土层开挖深度（36.5 m）的 0.03%，满足小于 0.3%H 的变形控制要求；第 6 步开挖时最大水平值变化较小，基本处于稳定状态，说明基岩开挖对地下连续墙变形影响很小；地下连续墙顶部和底部的收敛性比较好，顶部最大侧向变形只有 3 mm，进一步证明圆形基坑中冠梁的环向刚度能有效抑制围护结构的变形。

图 4 为圆形闸门井基坑地表沉降图。分析表明：

开挖初期地表沉降速率较大，开挖后期沉降速率趋于稳定；与闸门井连接的地面沉降随基坑开挖深度的逐渐增加，沉降也逐渐增大，开挖步 6 即基岩的开挖后，沉降值最大，最大沉降值为 8.6 mm，且地表沉降总体呈凹槽形发展，随着开挖的进行，沉降槽底部向着远离基坑侧发展。

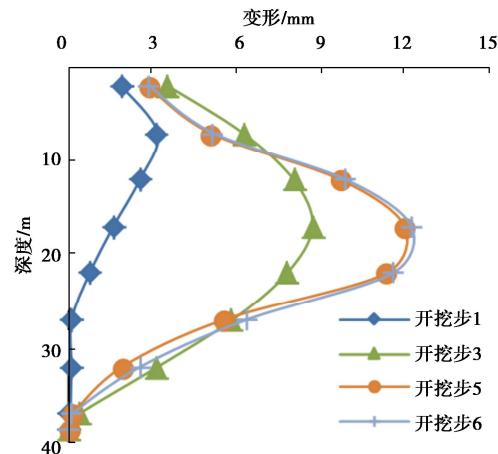


图 3 圆形基坑地下连续墙侧向变形

Fig. 3 Lateral deformations of diaphragm wall of circular foundation pit

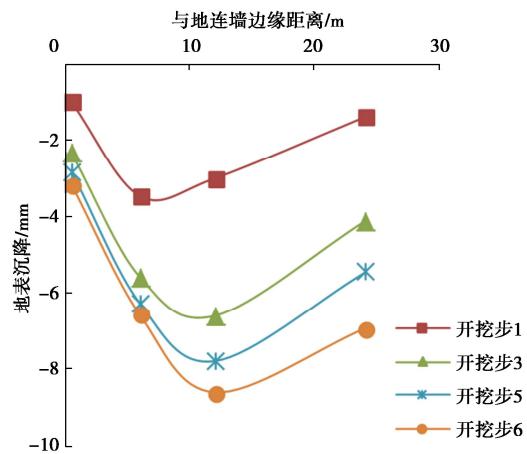


图 4 圆形闸门井基坑地表沉降

Fig. 4 Surface settlements of circular foundation pit with gate well

图 5 给出了圆形基坑开挖基坑外侧土压力变化情况。分析表明：地连墙墙体土体土压力随着开挖步的进行，土压力变化值逐渐增大，单条土压力变化曲线呈现非线性特征；开挖初期，土压力变化值为正值，主要是由于地连墙向坑外发生侧向位移，土体内产生了被动土压力，后期逐渐变为负值，这是因为在开挖过程中，地下连续墙向坑内变形，其与墙后的土体黏聚力降低，逐渐发生脱离，导致主动土压力减小，另外，与其他形状的基坑相比，圆形基坑发生拱效应，也会导致土压力减小。

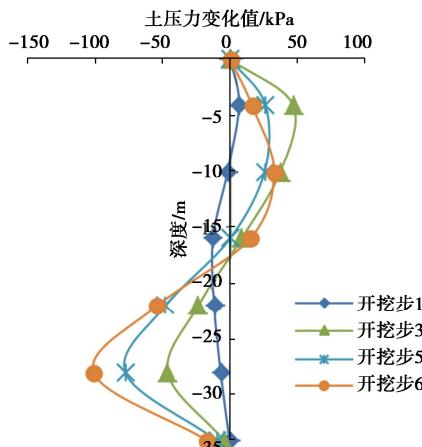


图 5 圆形基坑土压力变化情况图

Fig. 5 Variation of soil pressure of circular foundation pit

3.2 离心模型试验与数值模拟结果对比分析

基坑开挖过程当中比较关心的就是围护结构的变形, 围护结构变形过大会对整个工程的建设带来巨大的麻烦与安全隐患。图 6 为圆形闸门井基坑在开挖过程中 X 方向地下连续墙侧向变形云图, 其中, 图 6(a)~(d) 分别为第 1 步、第 3 步、第 5 步以及第 6 步地连墙开挖 X 方向的变形。由于圆形基坑为轴对称图形, 同一高度处各点的侧向变形相等。

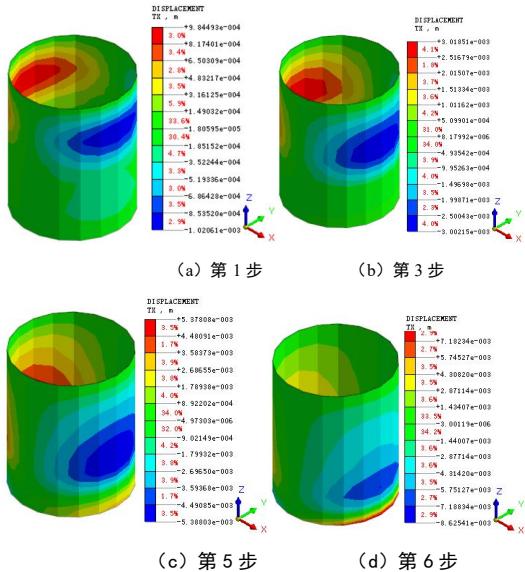
图 6 圆形闸门井地连墙 X 方向变形Fig. 6 Deformations of diaphragm wall of circular well gate in X direction

图 7 为圆形闸门井在某些开挖步骤地下连续墙侧向变形试验与数值模拟计算对比图。从图 7 中可以看出, 数值分析与离心模型试验结果基本一致, 基坑围护结构的变形均随着开挖的加深而逐渐变大, 最大值点逐渐下移, 但是下移的速度逐渐减小, 有稳定收敛的趋势, 开挖步 6 即开挖基岩部分后, 对地连墙的变形影响非常小, 最大值点的位置几乎不变, 只是最大值稍有增加。地下连续墙的侧向变形呈对称分布的状

态, 最大侧向变形出现在地下连续墙的中下部, 试验结果为 12.26 mm, 数值计算结果为 12.04 mm, 数值分析与离心模型试验结果在量值上稍有差异, 但是变形模式一致, 并且都呈现凸形变形,

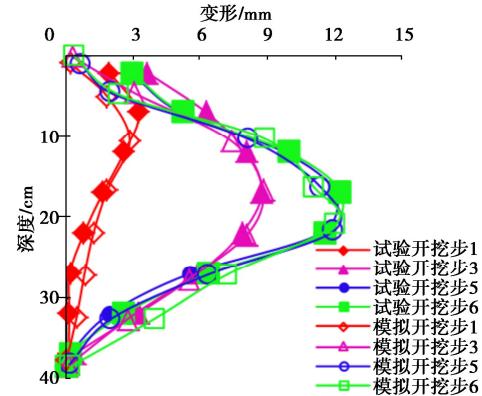
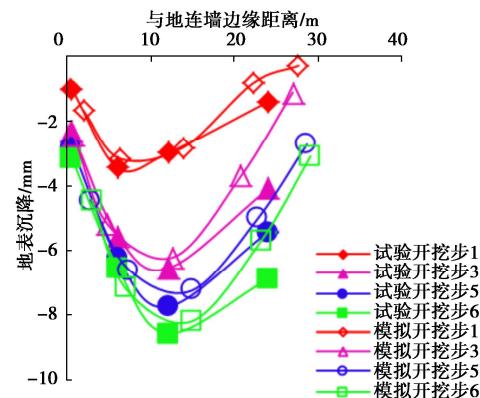


图 7 阀门井地连墙侧向变形

Fig. 7 Lateral deformations of diaphragm wall of gate well

在基坑开挖过程中, 需要重点关注基坑周围地表的沉降, 尤其是在基坑附近有其他建筑物的情况下, 基坑周围的不均匀沉降容易导致建筑物的破坏。图 8 为离心试验和数值模拟的闸门井基坑沉降曲线图。从图 8 沉降曲线图可以看出, 基坑外侧地表的沉降随着基坑开挖深度的增加逐渐增大, 沉降速率前期较大后期逐渐减小, 最终模拟趋于稳定。地表沉降呈凹槽形沉降形式, 随着开挖的进行槽底位置向远离基坑方向移动。试验开挖步 6 后, 闸门井基坑地表沉降值达到最大, 值为 8.6 mm, 数值模拟闸门井基坑外侧地表最大沉降也在开挖步 6, 值为 8.2 mm, 数值计算结果与试验结果非常吻合, 只相差 0.4 mm, 证明了两种结果的可靠性。但是最大沉降发生在地表的位置存在较大差异, 离心试验最大沉降发生在距离基坑侧约 12 m 的位置, 数值模拟最大沉降发生在距离基坑侧约 14 m 的位置, 相差 2 m, 根据实际需要可以综合考虑两种结果进行指导工程实践。

图 8 阀门井基坑 X 方向地表沉降曲线Fig. 8 Curves of surface settlement foundation pit with gate well in X direction

4 结 论

(1) 地连墙墙后土体的土压力变化呈现非线性, 随着开挖的进行, 土压力变化值逐渐增大, 墙后土体受到主动土压力和被动土压力的作用。由于基坑开挖卸荷, 导致地连墙发生了变形, 从而在墙体内外产生了相应的应力, 且应力的变化趋势和变形是一致的。

(2) 超深基坑支护结构水平位移随着开挖的加深而逐渐变大, 最大值点逐渐下移, 但是下移的速度逐渐减小, 有稳定收敛的趋势, 开挖到底部基岩后, 连续墙水平位移趋于相对稳定状态, 数值分析与离心模型试验结果在量值上稍有差异, 但是变形模式一致, 并且都呈现凸形变形。

(3) 地表沉降随着基坑开挖深度的增加逐渐增大, 呈凹槽形发展, 沉降速率前期较大后期逐渐减小, 最终趋于稳定。数值计算与试验得出的最大沉降值吻合较好, 证明了两种结果的可靠性。但是最大沉降发生在地表的位置存在较大差异, 在实际工程中需要综合考虑两种结果指导实际建设。

参 考 文 献:

- [1] 刘俊岩. 深基坑工程[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001. (LIU Junyan. Deep Foundation Pit Engineering[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2001. (in Chinese))
- [2] 王莹, 夏才初, 陈孝湘, 等. 基于离心试验下软黏土地区窄基坑稳定性分析[J]. 地下空间与工程学报, 2022, 18(6): 1853-1862, 1872. (WANG Ying, XIA Caichu, CHEN Xiaoxiang, et al. Stability analysis of narrow foundation pit in saturated soft clay area based on centrifugal test[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2022, 18(6): 1853-1862, 1872. (in Chinese))
- [3] 马险峰, 曹明洋. 上海软黏土深基坑在机开挖离心模型试验研究[J]. 土木工程学报, 2023, 56(8): 131-139. (MA Xianfeng, CAO Mingyang. Centrifuge model tests on excavation in Shanghai soft soil layers using in-flight excavation tools[J]. China Civil Engineering Journal, 2023, 56(8): 131-139. (in Chinese))
- [4] 陈仁朋, 刘书伦, 孟凡衍, 等. 软黏土地层基坑开挖对旁侧隧道影响离心模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(6): 1132-1138. (CHEN Renpeng, LIU Shulun, MENG Fanyan, et al. Centrifuge modeling of excavation effects on a nearby tunnel in soft clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(6): 1132-1138. (in Chinese))
- [5] 郭海庆, 陶善之, 张泉. 基于离心机模型试验的超深基坑受力变形研究[J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(1): 177-186. (GUO Haiqing, TAO Shanzhi, ZHANG Quan. Research on stress and deformation of super deep foundation pits based on the centrifugal model test[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2020, 16(1): 177-186. (in Chinese))
- [6] 冯志, 沈正龙, 孟庆亮, 等. 泵站深基坑支护结构的离心模型试验研究[J]. 水资源与水工程学报, 2019, 30(4): 183-188. (FENG Zhi, SHEN Zhenglong, MENG Qingliang, et al. Centrifugal model test of supporting structure of pump station deep foundation pit[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2019, 30(4): 183-188. (in Chinese))
- [7] 王国辉, 陈文化, 聂庆科, 等. 深厚淤泥质土中基坑开挖对基桩影响的离心模型试验研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(2): 399-407. (WANG Guohui, CHEN Wenhua, NIE Qingke, et al. Impacts of pit excavation on foundation piles in deep silty soil by centrifugal model tests[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(2): 399-407. (in Chinese))
- [8] 鲁泰山, 何欢, 刘松玉, 等. 基于 SCPTU 测试的软土基坑开挖数值模拟研究[J]. 土木工程学报, 2023, 56(增刊 2): 141-148. (LU Taishan, HE Huan, LIU Songyu, et al. Study on numerical simulation of soft soil foundation pit excavation based on SCPTU test[J]. China Civil Engineering Journal, 2023, 56(S2): 141-148. (in Chinese))
- [9] 张鹏, 邓智平, 王磊, 等. 基于 Midas GTS 的某近海深基坑开挖三维有限元数值模拟分析[J]. 甘肃科学学报, 2024, 36(1): 125-129. (ZHANG Peng, DENG Zhiping, WANG Lei, et al. 3D finite element numerical simulation analysis of deep foundation pit excavation based on Midas GTS[J]. Journal of Gansu Sciences, 2024, 36(1): 125-129. (in Chinese))
- [10] 包承纲, 饶锡保. 土工离心模型的试验原理[J]. 长江科学院院报, 1998, 15(2): 1-3, 7. (BAO Chenggang, RAO Xibao. Test principle of geotechnical centrifugal model[J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 1998, 15(2): 1-3, 7. (in Chinese))

(编校: 胡海霞)