

不对称深基坑变形性状现场监测分析

邵羿凯¹, 王立忠², 洪义², 李玲玲²

(1. 浙江大学 工程师学院, 浙江 杭州 310015; 2. 浙江大学 建筑工程学院, 浙江 杭州 310058)

摘要: 目前城市地下已预埋大量变形敏感结构, 基坑设计准则从稳定控制转为变形控制。基坑的变形性状与其三维构型密切相关, 现有研究常假设基坑是对称结构, 而实际工程中基坑常因具有附属结构而表现出非对称性。目前仍缺乏关于非对称基坑三维变形性状的深入认识, 相关现场数据也少有报道。为研究软土地区两侧支护形式不同的非对称基坑开挖过程中的变形规律, 现场实测了绍兴市轨道交通1号线非对称狭长深基坑在开挖过程中的墙体变形和坑外地表沉降。分析发现: (1) 基坑附属结构的存在使得围护结构的侧向位移及地表沉降与未加强侧变形差距达20%; (2) 基坑墙体测斜、坑外地表沉降沿狭长基坑方向的分布与附属结构关联不大, 近似遵循互补误差函数(erfc); (3) 软土地基中设附属结构可以显著控制基坑变形。本项目监测分析可为软土地区不对称深基坑设计与施工提供借鉴。

关键词: 非对称基坑; 围护结构; 地表沉降; 变形性状; 现场实测

中图分类号: TU753

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2024)03-0278-06

Field monitoring on deformation behavior of non-symmetrical foundation pit

SHAO Yi-kai¹, WANG Li-zhong², HONG Yi², LI Ling-ling²

(1. Polytechnic Institute, Zhejiang University, Hangzhou 310015, Zhejiang, China;

2. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, Zhejiang, China)

Abstract: A large number of deformation-sensitive structures have been pre-buried underground in urban areas, shifting the criteria for foundation pit design from stability control to deformation control. The deformation behavior of foundation pits is closely related to their three-dimensional configuration. Previous studies often assume that foundation pits are symmetrical structures, whereas in actual engineering, foundation pits often exhibit non-symmetry due to the presence of auxiliary structures. Currently, there is still a lack of in-depth understanding of the three-dimensional deformation behavior of non-symmetrical foundation pits, and there are few reports on related field results. In order to study the deformation behavior during the excavation process of non-symmetrical foundation pits with different supporting forms on both sides in soft soil areas, wall inclinometer measurements and surface settlement outside the foundation pit were measured on-site for the narrow and long deep foundation pit of Shaoxing Metro Line 1. The results show that the presence of auxiliary structures in the foundation pit leads to a discrepancy of up to 20% between the lateral displacement of the retaining structure and surface settlement compared to unreinforced side. The distribution of lateral displacement and the surface settlement is not strongly correlated with auxiliary structures, but approximately follows the complementary error function (erfc). The auxiliary structures in soft soil foundations can significantly control the foundation pit deformation. The conclusions drawn can provide guidance for the design and construction of non-symmetrical deep foundation pits in soft soil areas.

Key words: non-symmetrical foundation pit; retaining structure; surface settlement; deformation behavior; field measurement

0 引言

随着经济的高速发展, 我国的城市化持续推进, 在对既有市区范围地下空间的改造中, 由于周边环境复杂, 基坑两侧地表高差、土层特性、开挖深度、支护强度等存在差异的情况均可能在工程实例中出现^[1-3], 以上一系列的基坑不对称形式对基坑的设计与施工都提出了一定的挑战。

当前, 中外学者对非对称基坑的研究主要集中在基坑两侧地面超载及基坑两侧开挖深度存在明显差异这两种不对称的基坑形式。

理论方面, 喻军等^[4] 在考虑基坑阶段变形条件下对非对称基坑两侧土压力采用公式进行了描述。徐志兵^[5] 指出基坑围护结构中围护墙体的厚度增加及被动区的加固对两侧地表超载的不对称基坑的变形控制可以起到显著作用。但理论研究均集中于超载不平衡的不对称基坑。

实测方面, CHEN 等^[6] 对南京地区开挖不对称基坑进行数值分析与比较。姚爱军等^[7] 对超载不对称地铁车站深基坑进行了数值计算与施工过程的模拟。目前尚未有针对围护结构不对称深基坑的研究与实测值分析。

综上所述, 目前国内对于非对称基坑开展的研究较少, 仍无法完善地认识非对称基坑的变形规律, 不同地区不同土质的非对称基坑工程没有对应的工程参考案例。

基于此, 本文以绍兴市越城区某建于淤泥质黏土场地的工程项目为例, 对不对称支护基坑的变形性状开展针对性的研究, 为类似工程提供经验借鉴。

1 工程概况及特点

1.1 工程场地概况

绍兴轨道交通镜水路站位于群贤路与镜水路交叉处, 车站整体为东西向, 本站为地下 2 层岛式车站。车站标准段宽为 18.3 m, 标准段底板深度约 16.34 m; 端头井基坑宽为 24.5 m, 底板深度为 18.04 m。车站随周边交通条件, 在南北两侧各设 2 个出入口, 另设有 1 个紧急疏散口及 2 组风亭。

车站东北侧为唯美花园小区, 小区主楼共 12 层, 采用钢筋混凝土框架结构, 包含 1 层地下车库, 底板底距地面约 3.9 m。小区地下室轮廓与主体基坑最小水平净距约 15 m, 与附属基坑最小水平净距约 9.4 m, 主体基坑安全等级 and 环境保护等级均按

一级控制。为加强该段刚度, 在基坑设计过程中将风亭及出入口基坑设于靠近住宅侧, 控制基坑变形, 镜水路站平面见图 1。

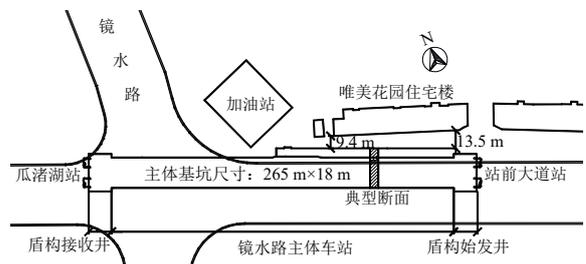


图 1 镜水路站平面简图

Fig. 1 Layout of Jingshui road station

1.2 水文地质条件

镜水路站场地地基土依次分布有①₁素填土、②₁粉质黏土、③₁₋₂淤泥质黏土、⑤₁淤泥质黏土、⑥₁粉质黏土、⑦₃粉质黏土、⑧₃₋₂圆砾。车站底板位于③₁₋₂淤泥质黏土层, 围护结构插入⑧₃₋₂圆砾层, 基坑地质纵断面如图 2 所示, 土层物理力学参数可见表 1。

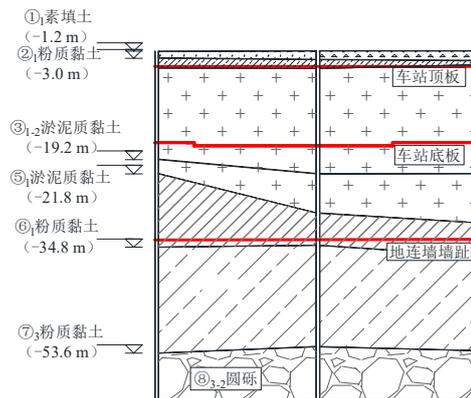


图 2 基坑地质纵断面图

Fig. 2 Geological profile of the foundation pit

表 1 土层物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of soils

土层	重度 $\gamma/(\text{kN}/\text{m}^3)$	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	压缩模量 E_{s1-2}/MPa
① ₁ 素填土	18.5	—	—	—
② ₁ 粉质黏土	18.7	24.0	16.9	4.5
③ ₁₋₂ 淤泥质黏土	17.1	11.5	13.9	2.4
⑤ ₁ 淤泥质黏土	17.4	10.8	13.6	2.7
⑥ ₁ 粉质黏土	19.1	26.5	18.6	4.7
⑦ ₃ 粉质黏土	19.4	44.0	20.8	6.2
⑧ ₃₋₂ 圆砾	20.0	—	—	15.0

地质勘察期间, 案例场地所取各勘探孔测得的实际孔隙潜水埋深为 0.70~1.40 m, 相应标高为 3.87~5.15 m。

2 基坑支护方案

出于车站使用、基坑围护结构与周边环境的控制要求及工程经济性等各项要求，车站主体基坑采用 800 mm 厚地下连续墙与内支撑相结合的形式，车站附属基坑采用咬合桩+内支撑的形式。

车站围护结构的入土深度根据车站基坑的开挖深度，结合场地的地质条件，按坑底抗隆起、墙底抗隆起、抗渗流、抗突涌和整体稳定性等要求进行验算，并结合杭州及宁波等地区软土深基坑的工程经验确定。最终确定的地下连续墙插入比为 1.26~1.34。为减少施工时对唯美花园小区的影响，附属基坑咬合桩与主体围护结构同期施工，附属基坑围护结构采用直径 800 mm、间距 600 mm 咬合桩，一序桩和二序桩间隔布置，相互咬合，咬合厚度为 250 mm，最大深度为 31.5 m，最小深度为 20 m。由于附属基坑围护结构在基坑开挖前施作，附属基坑咬合桩围护与主体基坑部分地连墙形成类似双排桩结构，导致基坑东侧在开挖阶段两侧支护结构强度不一致，构成支护结构不对称基坑。

为了较好地控制地表变形及增强基坑的整体性，主体基坑标准段采用 1 道混凝土支撑+4 道钢支撑，靠近唯美花园小区地下室部分采用 2 道混凝土支撑+3 道钢支撑，盾构井段采用 2 道混凝土支撑+4 道钢支撑+1 道钢倒撑。

3 基坑开挖方案

镜水路站根据实际情况，将车站分为东基坑、西基坑、附属基坑，3 个基坑如图 3 所示，根据基坑支护强度不对称及控制变形的整体要求确定基坑支护及施工方案：

基坑开挖顺序按照①东基坑→②西基坑→③附属基坑的步序进行开挖。3 个基坑次第开挖顺序具体为：2020 年 1 月完成基坑围护结构及旋喷桩施工；东侧基坑施工自 2020 年 2 月—4 月完成土方开挖及底板浇筑施工；西侧基坑自 2020 年 4 月—9 月完成土方开挖及底板浇筑施工；附属基坑自 2020 年 11 月—12 月完成土方开挖及底板浇筑施工。

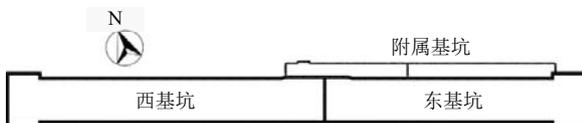


图 3 分坑开挖简图
Fig. 3 Excavation sequence of Jingshui road station

基坑分为 5 个大层开挖，开挖时充分利用“时空效应”理论，遵循“分层、分段挖土，先中间后两边”的原则组织施工。东、西侧基坑均由端头处向分隔墙方向开挖，每块土体开挖时按照先开挖中部土体再开挖两侧土体的顺序，通过留土护壁尽可能减少围护结构的变形。

4 基坑监测结果

4.1 基坑监测方案

结合基坑本身工程地质条件、设计薄弱点、周边构筑物的控制条件以及工程项目经济性，基坑开挖过程监测项目如表 2 所示，镜水路站典型截面简图如图 4 所示。

表 2 基坑开挖过程监测项目
Table 2 Monitoring projects for excavation process of foundation pit

监测项目	数量
支护桩顶水平位移/竖向位移	28 组
围护墙深层水平位移	16 孔
立柱竖向位移	17 个
支撑轴力	10 组
地表竖向位移	116 个
地下水水位	14 孔
周边建筑物	37 个
土体深层水平位移	3 孔

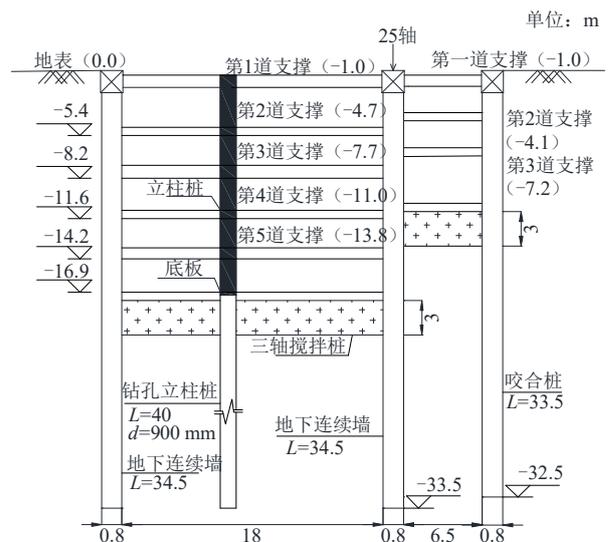


图 4 镜水路站典型截面简图
Fig. 4 Typical cross-section of Jingshui road station

4.2 开挖实测数据

(1) 典型断面变形曲线对比

开挖过程中在东基坑与西基坑一半长度位置

各自选取典型断面监测点, 提取基坑开挖至第 3 层及基坑开挖完毕时基坑两侧围护结构的变形数据进行了比较。

提取监测日报中不同阶段围护结构变形曲线如图 5~6 所示。对比发现, 东基坑南侧地连墙的变形远大于北侧地连墙以及附属基坑围护墙体的变形。当基坑开挖至坑底设计标高时, 南侧地连墙的最大侧向位移为 112.87 mm, 北侧地连墙及附属基坑围护墙体的最大侧向位移分别为 87.63 mm 与 51.89 mm, 南侧地连墙变形相较于北侧地连墙高出约 20%。西基坑由于两侧支护条件一致, 南侧与北侧的变形量与变形趋势无明显差异。

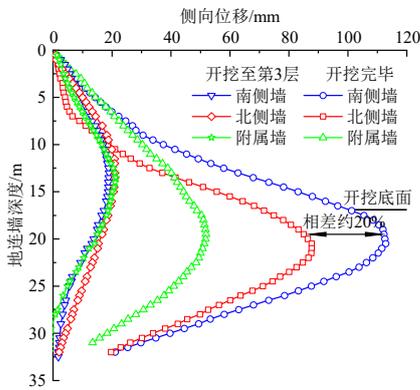


图 5 东基坑围护结构变形

Fig. 5 Deformation of retaining structure of eastern foundation pit

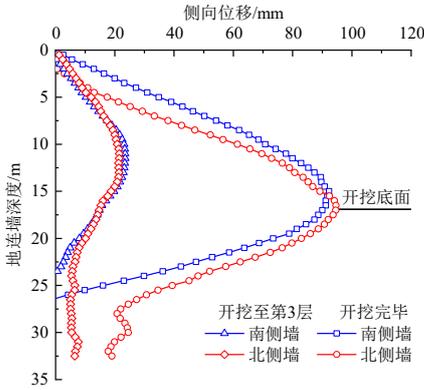


图 6 西基坑围护结构变形

Fig. 6 Deformation of retaining structure of western foundation pit

(2) 基坑变形图对比

基于监测日报的结果, 对工程案例东、西侧基坑各自开挖至坑底后基坑围护结构发生的最大侧向位移数据进行了整理, 绘制得到基坑侧向变形图如图 7~9 所示。

通过基坑侧向变形图对比得到: 东基坑围护结构在西基坑开挖前后总体变形趋势不变, 西基坑南北两侧地质条件、周边环境相近, 且围护结构对称,

故西基坑一半长度处北侧围护结构最大侧向位移为 92 mm, 南侧围护结构最大侧向位移为 95 mm, 变形量较为接近。东基坑南北侧周边环境有较大差异, 主要体现在建筑物荷载及不对称围护结构两方面, 南侧围护结构最大侧向位移远大于北侧围护结构最大侧向位移, 主体基坑开挖完毕时, 东基坑一半长度处北侧围护结构最大侧向位移为 87 mm, 南侧围护结构最大侧向位移为 123 mm, 非对称支护狭长基坑正常支护侧最大变形量比支护加强侧变形高出约 30%。对比东西侧基坑地连墙变形发现, 东基坑南侧围护结构最大侧向位移较西基坑南侧围护结构最大侧向位移高 15%, 且东基坑北侧围护结构最大侧向位移较西基坑北侧围护结构最大侧向位移减少 5%。

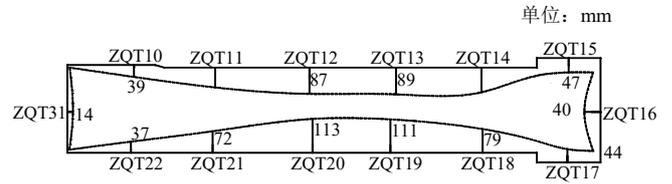


图 7 东基坑开挖完毕时侧向变形图

Fig. 7 Lateral deformation diagram of retaining structure when eastern excavation is completed

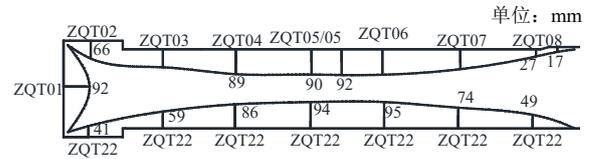


图 8 主体基坑开挖完毕时西基坑侧向变形图

Fig. 8 Lateral deformation diagram of retaining structure in western pit when main excavation is completed

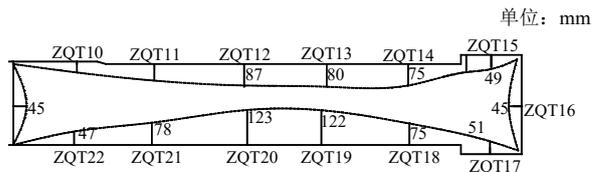


图 9 主体基坑开挖完毕时东基坑侧向变形图

Fig. 9 Lateral deformation diagram of retaining structure in eastern pit when main excavation is completed

通过东、西侧基坑开挖完成后的围护结构最大侧向位移可知, 建筑物荷载及不对称围护结构是影响东基坑南北侧围护结构最大侧向位移差距较大的原因, 尤其是附属基坑围护结构的影响。正常支护侧侧向位移更大的原因是附属基坑侧支护强度过大导致基坑发生一定程度的偏转。

(3) 墙后地表沉降槽对比

ROBOSKI 等^[8]和 FINNO 等^[9]基于软黏土中的一些历史案例, 发现平行于开挖区域方向坑后沉降槽的沉降量可以用互补误差函数 (erfc) 拟合:

$$\delta_v = \delta_{vmax} \left\{ 1 - \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[\frac{2.8(X-A)}{0.5L-A} \right] \right\} \quad (1)$$

式中： δ_{vmax} 为开挖区域中心处的地面沉降量（预计最大沉降量）； L 为基坑长度； A 为 $\delta_v = 0.5 - d_{vmax}$ 处（即 erfc 曲线的拐点）与开挖区域最近的转角之间的距离。

基于监测日报的结果，在基坑开挖完成后对东、西两侧基坑距围护结构7m、12m处监测得到的地表沉降数据分别绘制沉降槽如图10~11所示，用ROBOSKI公式的拟合结果如图中列出。对比得到：基坑墙后地表沉降大致符合互补误差函数的预测，且其平面假定在基坑 $0.3L \sim 0.7L$ 内成立，东侧不对称支护基坑围护结构两侧沉降曲线较西侧对称支护基坑围护结构两侧沉降曲线变化幅度更大；东侧不对称支护基坑地表拟合后的沉降量显著高于西侧对称支护基坑拟合后沉降量，且收敛幅度小。比较东侧不对称支护基坑围护结构两侧沉降曲线，正常支护侧沉降幅度小于附属基坑侧地表沉降。通过对比东、西侧基坑开挖完成后的地表沉降曲线可知，不对称围护结构可能造成周边地表沉降幅度变大，幅值达到20%，对地表沉降范围也有一定的影响，地表沉降范围约增大10%。

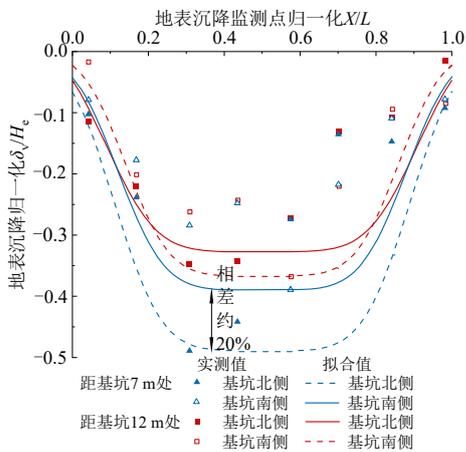


图10 东基坑拟合沉降槽对比

Fig. 10 Settlement trough correlation of eastern foundation pit

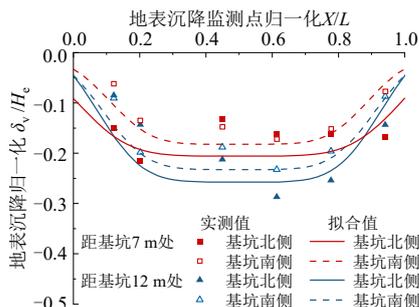


图11 西基坑拟合沉降槽对比

Fig. 11 Settlement trough correlation of western foundation pit

(4) 同类基坑变形情况对比与分析

基于镜水路站工程实测得到的基坑侧向变形函数，与杭州^[10-12]、上海^[13]、台北^[14]以及新加坡^[15]等地的同类狭长型基坑进行了最大侧向位移的比较，如图12所示。

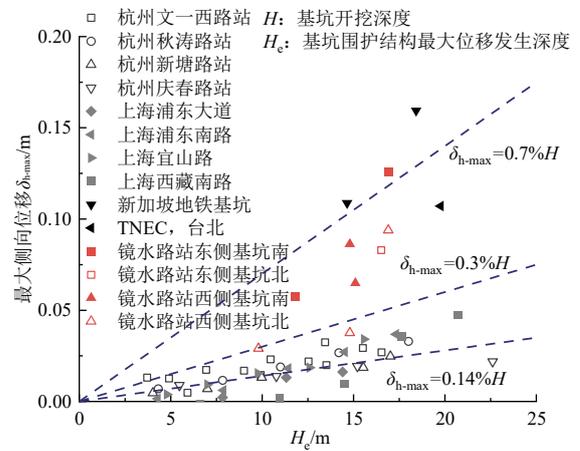


图12 同类地铁车站侧向位移比较

Fig. 12 Comparison of lateral displacements of similar subway stations

对比发现，绍兴地区淤泥质黏土地基中开展的狭长型深基坑侧向位移要大于杭州、上海地区开展的同类型狭长深基坑的最大侧向位移。东基坑正常支护侧最大侧向位移与新加坡及台北同类型狭长型基坑的最大侧向位移接近。东基坑加强支护侧最大侧向位移较小，证明了附属结构对于淤泥质黏土地基中的深基坑围护结构变形有较好的控制作用。

通过与地质条件相近的杭州地区同类型基坑围护结构的变形比较发现，镜水路站基坑含附属结构一侧的变形较小。附属基坑发挥控制作用的原因可能是附属基坑的存在导致该侧地连墙后的土压力大于正常支护侧地连墙后的土压力，故附属结构侧土体更不容易发生被动破坏。

5 结论

本文依据绍兴地铁1号线镜水路站支护结构不对称深基坑施工，针对基坑开挖过程中的监测数据开展了研究，探究支护结构不对称的深基坑工程在施工过程中的变形规律，得出主要结论如下：

(1) 支护结构不对称基坑的附属结构侧对基坑的变形控制效果较显著，在镜水路站深基坑开挖过程中，围护结构侧向位移随基坑开挖深度增加逐渐变大，开挖至坑底时，正常支护一侧的变形较附属结构一侧的变形高20%，正常支护侧变形更大的原因为附属基坑侧整体结构强度过大导致基坑发

生一定程度偏转。

(2)在镜水路站基坑施工过程中,西侧对称基坑在开挖至坑底时两侧围护结构的变形量相近,东侧非对称基坑受周边高层建筑及附属基坑的影响,出现了显著的不对称变形,且后续的分坑开挖对于基坑的不对称变形影响较轻微。

(3)墙后沿基坑轴向方向的地表沉降槽近似遵循 ROBOSKI 的拟合公式,东侧不对称支护基坑地表拟合后的沉降量显著高于西侧对称基坑拟合后的沉降量,且收敛幅度小,同时平面应变假设只在 $0.3L\sim 0.7L$ 范围内近似成立。

(4)围护结构不对称基坑的附属结构可以起到良好的变形控制作用。

参考文献

- [1] 徐长节,成守泽,蔡袁强,等.非对称开挖条件下基坑变形性状分析[J].岩土力学,2014,35(7):1929-1934.
XU Chang-jie, CHENG Shou-ze, CAI Yuan-qiang, et al. Deformation characteristic analysis of foundation pit under asymmetric excavation condition[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(7): 1929-1934.
- [2] 林刚,徐长节,蔡袁强.不平衡堆载作用下深基坑开挖支护结构性状研究[J].岩土力学,2010,31(8):2592-2598.
LIN Gang, XU Chang-jie, CAI Yuan-qiang. Research on characters of retaining structures for deep foundation pit excavation under unbalanced heaped load[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(8): 2592-2598.
- [3] 徐锦斌,杨辉,郑锋利.不对称土岩组合对深基坑支护变形的影响[J].建筑技术,2014,45(3):207-211.
XU Jin-bin, YANG Hui, ZHENG Feng-li. Influences of asymmetric soil-rock combination on supporting deformation for deep foundation pit[J]. Architecture Technology, 2014, 45(3): 207-211.
- [4] 喻军,鲁嘉,龚晓南.考虑围护结构位移的非对称基坑土压力分析[J].岩土工程学报,2012,34(增刊):24-27.
YU Jun, LU Jia, GONG Xiao-nan. Earth pressure on supporting structures of asymmetric excavations considering their displacement[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(S): 24-27.
- [5] 徐志兵.不对称荷载作用下的基坑变形研究[D].南京:东南大学,2005.
XU Zhi-bing. Study on deformation of foundation pit under asymmetric load[D]. Nanjing: Southeast University, 2005.
- [6] CHEN X, XU W, DUAN C J. Numerical study on asymmetric excavation-induced supporting structure effect of ∞ -shape super deep foundation pit[C]//2011 International Conference on Electric Technology and Civil Engineering (ICETCE). IEEE, 2011: 516-520.
- [7] 姚爱军,张新东.不对称荷载对深基坑围护变形的影响[J].岩土力学,2011,32(增刊2):378-382,388.
YAO Ai-jun, ZHANG Xin-dong. Influence of asymmetric load on supporting deformation for deep foundation pit[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(S2): 378-382, 388.
- [8] ROBOSKI J, FINNO R J. Distributions of ground movements parallel to deep excavations in clay[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2006, 43(1): 43-58.
- [9] FINNO R J, BLACKBURN J T, ROBOSKI J F. Three-dimensional effects for supported excavations in clay[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2007, 133(1): 30-36.
- [10] 许斌.杭州软土地区地铁车站深基坑开挖引起的变形效应分析研究[D].杭州:浙江工业大学,2016.
XU Bin. Analysis on effect of deep foundation pit excavation of metro station in soft soil area of Hangzhou[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2016.
- [11] 杨有海,武进广.杭州地铁秋涛路车站深基坑支护结构性状分析[J].岩石力学与工程学报,2008,27(增刊2):3386-3392.
YANG You-hai, WU Jin-guang. Analysis of retaining structures for deep foundation pit of Qiutao Road station in Hangzhou metro[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(S2): 3386-3392.
- [12] 丁智,王达,虞兴福,等.杭州地铁新塘路、景芳路交叉口工程深基坑监测分析[J].岩土工程学报,2013,35(增刊2):445-451.
DING Zhi, WANG Da, YU Xing-fu, et al. Monitoring and analysis of deep foundation pit at Xintang Road-Jingfang Road cross of Hangzhou metro[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(S2): 445-451.
- [13] WANG Z W, NG C W W, LIU G B. Characteristics of wall deflections and ground surface settlements in Shanghai[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2005, 42(5): 1243-1254.
- [14] OU C Y, HSIEH P G, CHIOU D C. Characteristics of ground surface settlement during excavation[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1993, 30(5): 758-767.
- [15] WALLACE J C, HO C E, LONG M M. Retaining wall behaviour for a deep basement in Singapore marine clay[J]. Retaining Structures, 1993: 195-204.