

世博轴深大基坑逆作法施工变形控制研究

元翔, 孙玉永, 官全美, 周顺华

(同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 200092)

摘要: 以上海世博会世博轴及地下综合体工程 1 标段逆作法施工深大基坑为背景, 通过离心模型试验对比研究了 3 种不同的预留土台纵向开挖宽度及有无斜抛撑情况下连续墙的变形规律; 在此基础上, 结合“时空效应”理论进行了数值计算分析, 研究了斜抛撑对围护结构变形的控制作用。结果表明: 在深大基坑逆作法施工中, 中板预留土台纵向开挖宽度对连续墙的变形影响较大; 底板预留土台纵向开挖宽度对连续墙的变形影响较小, 原因在于开挖底部预留土台中板和斜抛撑有效地控制了连续墙的变形。根据本基坑的环境保护等级, 建议在基坑东侧设置斜抛撑, 而在基坑西侧可不设置斜抛撑。

关键词: 基坑工程; 逆作法; 斜抛撑; 预留土台; 纵向开挖宽度; 离心模型试验

中图分类号: TU447

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2009)07-1127-06

作者简介: 元翔(1984-), 男, 博士研究生, 主要从事岩土工程方面的研究工作。E-mail: yuanx1984@163.com。

Deformation control of large and deep foundation pit of Shanghai Expo axis by use of top-down construction method

YUAN Xiang, SUN Yu-yong, GONG Quan-mei, ZHOU Shun-hua

(Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Aiming at the deep and large foundation pit of Shanghai Expo axis and the complex underground project's No.1 tendering section by use of the top-down construction method, the deformation rules of underground diaphragm walls under three different longitudinal excavation widths of the remaining berm and with or without inclined bracing setting are compared through centrifuge model tests. The effect of the inclined bracing on the enclosure deformation control is studied by numerical analysis considering the time-space effect. Results show that the longitudinal excavation width of the remaining berm at the middle plate has a great effect on the deformation of underground diaphragm walls, but that at the base plate has a less effect. It is thought that the middle plate and the inclined bracing have a large contribution to the deformation control of underground diaphragm walls. According to the environmental protection grade of the foundation pit, the inclined bracing is proposed to be set on the east side, and considered to be unnecessary on the west side.

Key words: excavation engineering; top-down construction method; inclined bracing; remaining berm; longitudinal excavation width; centrifuge model test

0 引言

近年来, 基坑工程呈现出了开挖面积大、开挖深度深、形状复杂、支护结构型式多样和周边环境保护要求严格等特点, 超大深基坑采用逆作法施工, 十分适合市区建筑密度大, 邻近建筑物、地铁、地下管线及周围环境对沉降变形敏感的情况^[1]。采用逆作法施工, 利用主体结构顶、中板作为支撑, 由于主体结构混凝土板刚度大, 可以减小围护结构的变形和地面沉降。但是, 在利用主体结构板作为支撑体系的一部分时, 由于在浇注结构板的过程中, 立模、扎筋、浇注、养护期间需要花费大量的时间, 在此期间围护结构由于支撑不及时, 无支护暴露时间长, 反而会产生更大

的变形。因此, 在开挖深度较大时, 还需要设置预留土台(在开挖时控制围护结构的变形)及斜抛撑(在挖去预留土台时控制围护结构的变形)以控制围护结构的变形。

软土具有流变性, 这是深基坑工程考虑时空效应的前提。上海地区地下 30 m 深度以内的地层多属流塑和软塑黏土, 大多数深基坑处在此深度范围内。这种地层的土体具有高含水率、高灵敏度、高压缩性、低密度、低强度、低渗透性等特性, 其流变性尤其显著。深基坑施工过程中始终存在时间和空间效应, 理

论分析和实践都已证明在基坑的开挖过程中坑周地层位移与施工时间及空间尺寸、形状密切相关^[2-3]。

国内许多学者采用多种方法研究了逆作法施工下基坑开挖过程中围护结构的变形特征,但对斜抛撑和预留土台纵向开挖宽度的研究较为鲜见^[4-10]。本文将通过离心模型试验并结合数值分析来研究考虑时空效应的斜抛撑和分块开挖预留土台对围护结构变形的控制作用。图 1 为分块开挖预留土台的纵向宽度示意图。

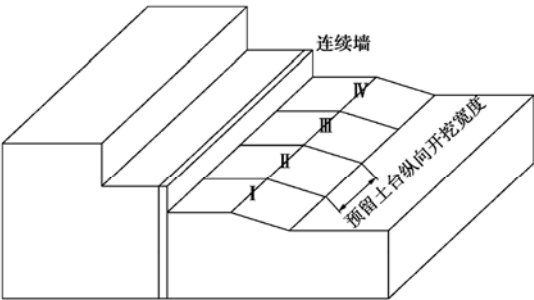


图 1 预留土台纵向开挖宽度示意图

Fig. 1 Longitudinal excavation width of remaining berm

1 工程概况

上海世博会世博轴基坑工程位于浦东世博园区,连通两座地铁车站,一个磁浮车站。总长度 1048 m,宽 68~110 m,最大挖深 22 m。本文研究背景为世博轴及地下综合体工程 1 标段,基坑净尺寸为 205 m×110 m,分为深三层和浅三层两部分。工程场地标高为 +4.2 m,深三层开挖深度为 21.5 m,浅三层开挖深度为 17 m,深浅交界处设置地下连续墙分隔,分隔顶标高至浅三层底板。浅三层外侧采用水泥土搅拌桩加固,基坑内采用旋喷桩加固;深三层坑外不加固,坑内采用旋喷桩加固。本文选取浅三层断面进行研究,主要

土层物理力学参数见表 1,工程概况及地质剖面见图 2。由于浅三层外侧采用水泥土搅拌桩作为挡墙,该基坑地下一层采用明挖,地下二层以下采用逆作法施工,围护结构采用地下连续墙,墙厚 1 m,深 33 m,设计土台宽 8 m。施工顺序为先开挖至连续墙顶部以下 0.6 m (标高-1.68 m),然后施作第一层中板;待中板到达设计强度后,在第一层中板和预留土台(土台顶标高-3.48 m)的支撑下以 1:2.5 坡度开挖至第二层中板处(标高-7.3 m),施作基坑中部的第二层中板;待中板到达设计强度后,架设斜抛撑,挖除预留土台,然后施作剩余的第二层中板;待中板到达设计强度后,拆除斜抛撑;按上述方法继续开挖至坑底(标高-12.8 m),并施作底板。

本工程基坑东侧紧邻已经建成的 M8 线耀华路地铁站和地下隧道,南侧紧邻即将施工的 M7 线上南路地铁站。基坑距离在建地铁站 20 m 左右。基坑施工既影响已经建成的地铁站和隧道,又存在与即将施工的 M7 线的基坑的相互影响问题。故基坑变形控制保护等级:基坑东侧(上南路侧) 1 级;基坑南侧(耀华路侧) 1 级;基坑西侧(规划园三路侧): 2 级。相应的围护结构最大允许水平位移为 0.14%H, 0.14%H, 0.3%H (H 为基坑开挖深度)^[11]。

2 离心试验

2.1 试验原理

离心模型试验的实质是用离心力来模拟自重效应。根据近代相对论的解释,牛顿的重力与惯性力是等效的,故原型在地球上受到的重力与模型在离心机上受到的离心力所产生的物理效应是一致的。由于惯

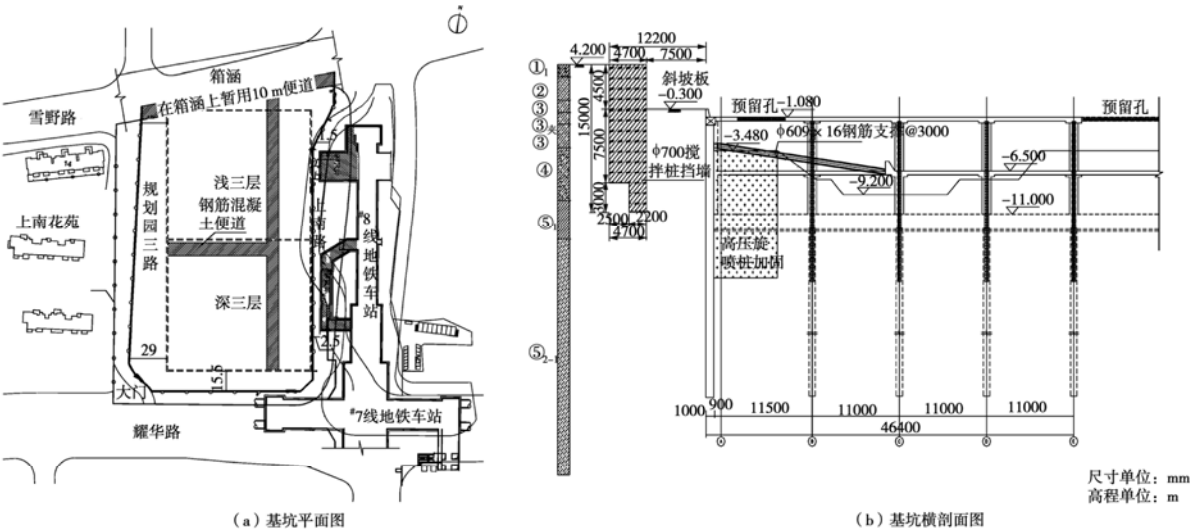


图 2 基坑周围环境和横剖面图

Fig. 2 Environment around foundation pit and cross section

表 1 各土层的物理力学参数
Table 1 Physico-mechanical parameters of soil layers

层号	土层名称	厚度 /m	天然重度 /(kN·m ⁻³)	孔隙比 <i>e</i>	天然含水率 <i>w</i> /%	压缩模量 /MPa	黏聚力 /kPa	内摩擦角 /(°)
① ₁	填土	1.2						
② ₁	褐黄—灰黄色黏土	2.4	18.5	0.911	31.7	4.89	21	19.0
③	灰色淤泥质粉质黏土	1.2(2.4)	17.3	1.198	42.3	3.27	12	19.0
③ _夹	灰色黏质粉土	1.2	18.1	0.972	34.4	11.05	5	29.5
④	淤泥质黏土	5.4	16.5	1.458	50.9	1.99	14	11.0
⑤ ₁	灰色黏土	4.0	17.4	1.195	41.8	3.06	14	15.0
⑤ ₂₋₁	灰色砂质粉土 夹粉质黏土	24.2	18.1	0.938	32.4	8.91	4	29.0

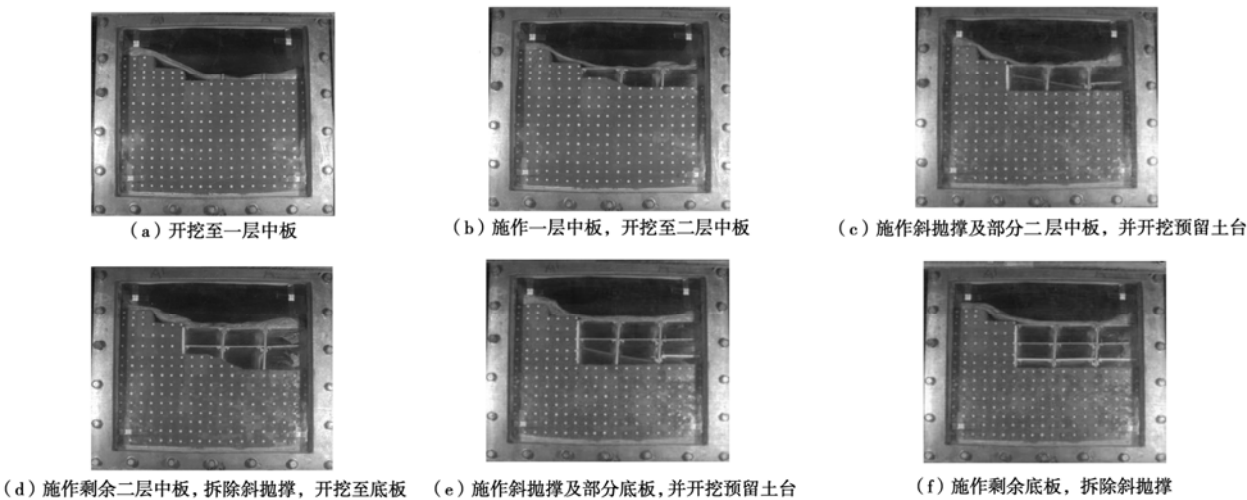


图 3 设置斜抛撑时的不同工况模型变形图

Fig. 3 Deformation under different working conditions and inclined bracing setting

性力与重力等效，且工程材料性质未变，从而使模型与原型的应力应变相等、变形相似、破坏机理相同，能再现原型特性^[5]。

2.2 试验过程

本次离心模型试验采用的是同济大学的 L-30 型离心机，该机的主要性能参数见文献[12]。根据模型箱的尺寸将模型率取为 140，试验用土为取自现场的原状土。试验中控制模型土样的重度、含水率和土体的强度指标，将重塑后的土体（含水率 80%左右）在离心机内由下至上进行分层固结。在土样制备过程中，每一次同时固结两箱土样，其中一箱土样用于基坑开挖的离心模型试验，另外一箱土样专门进行土工试验，测试土体的物理力学参数，使模型土样各项控制指标的数值与现场值相近。根据抗弯刚度相似原则采用铝板模拟连续墙，铝棒模拟钻孔灌注桩与格构柱，紫铜棒模拟斜抛撑，采用向土体中混入 15%掺量的水泥浆来模拟搅拌桩及高压旋喷桩对土体的加固作用。

为了研究斜抛撑对基坑稳定性的作用，进行了设置斜抛撑和不设斜抛撑的两组对比试验，并根据本试

验模型箱的大小，在每组试验中对预留土台分 3 次开挖完成，纵向开挖宽度分别为 5，10，20 m。根据试验结果照片，量测连续墙的水平位移以及观察墙后土体主动区是否发生倾覆破坏。

2.3 试验结果

试验时通过同步摄像系统对模型在试验中的全过程进行监控，并拍摄模型的照片，设置斜抛撑时的试验照片见图 3。因不设置斜抛撑时的试验过程与设置斜抛撑时的试验过程基本一致，故不再重复。

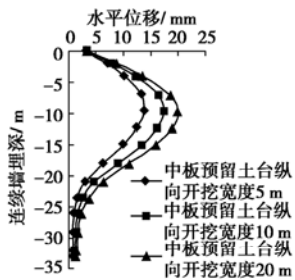
通过图片软件处理分析试验照片，以获取所需要的特征点位移数据，见图 4。

图 4 (c) 中开挖至-1.68 m、开挖至-3.48 m、开挖二层中板预留土台、开挖至-9.1 m、开挖底板预留土台所对应的不同工况模型变形图分别为图 3 中的 (a) ~ (e)。

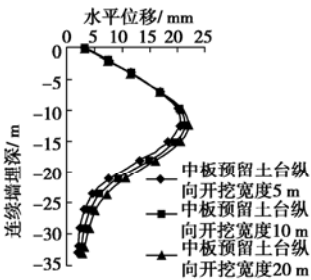
从图 4 (a)、(b) 中可以看出，中板预留土台纵向开挖宽度对连续墙的变形影响较大，当开挖宽度分别为 5，10，20 m 时，连续墙的最大水平位移分别为 13.7，17.4，19.9 mm，但过小开挖宽度又增加了施工

难度，因此建议中板预留土台纵向开挖宽度为 10 m；底板预留土台纵向开挖宽度对连续墙的变形影响较小，当开挖宽度分别为 5，10，20 m 时，连续墙的最大水平位移分别为 20.3，21.3，21.9 mm，因此建议底板预留土台纵向开挖宽度为 20 m。

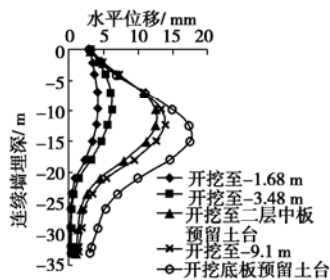
在图 4 (c) 中，二层中板、底板预留土台开挖后连续墙的最大水平位移增加量分别为 6.4 mm 和 3.6 mm，在图 4 (d) 中，二层中板、底板预留土台开挖后连续墙的最大水平位移增加量分别为 10.8 mm 和 3.7 mm。可见，在开挖底板预留土台时，由于中板已形成了封闭的支撑体系，具有较大的刚度，这就有效地控制了连续墙的水平变形。



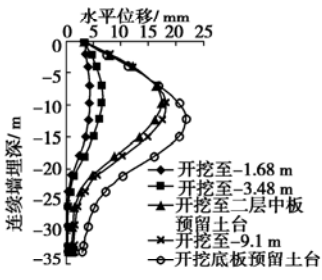
(a) 中板预留土台不同纵向开挖宽度所对应的连续墙水平位移



(b) 底板预留土台不同纵向开挖宽度所对应的连续墙水平位移



(c) 设置斜抛撑时连续墙的水平位移



(d) 不设置斜抛撑时连续墙的水平位移

图 4 连续墙水平位移曲线对比

Fig. 4 Comparison of horizontal displacements of diaphragm wall

从图 4 (c)、(d) 中可以看出，斜抛撑的存在对于控制连续墙的变形具有明显的作用。二层中板预留土台开挖之后，有斜抛撑时连续墙的最大水平位移为 12.5 mm，而无斜抛撑时，连续墙的最大水平位移为 17.4 mm；底板预留土台开挖之前，有无抛撑情况下，连续墙的最大水平位移分别为 13.8 mm 和 18.2 mm；底板预留土台开挖之后，连续墙的最大水平位移分别为 17.4 mm 和 21.9 mm。

在本次试验中，-1.08 m 板是考虑采用土模施工的，即开挖深度为-1.68 m，但在后来实际工程施工中该层板的模板是采用短支架，开挖深度在-3.93 m。考虑到离心试验的不可重复性以及再次试验耗费的时间较多，采用数值模拟对不同开挖深度连续墙的变形进行对比。

3 数值模拟

根据文献[3]，在基坑支护结构的设计计算中常规采用的杆系有限元法，只要给定土压力和基床系数，就可以求解出挡土结构的内力与变形。图 5 为弹性杆系有限元法计算简图。

基坑开挖过程中，由于软土的流变性，被动区土压力和基床系数都是变化的，通过改变土压力和基床系数的值模拟不同时刻的连续墙变形。根据文献[13]，基床系数取值为

$$K = aK_0 \frac{1}{(N+1)^b}, \tag{1}$$

式中， K 为基床系数， K_0 为初始基床系数， N 为暴露天数， a ， b 为回归系数，分别为 0.8425，0.5184。其中，初始基床系数 K_0 根据文献[11]进行取值，暴露天数按照实际施工过程中的时间进行取值。

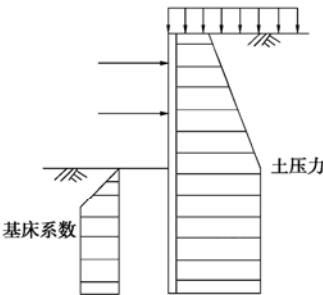


图 5 弹性杆系有限元法计算简图

Fig. 5 Plane of finite bar elements

将数值模拟的结果与离心试验的结果进行比较，见图 6，结果表明，数值模拟的结果可以较好的反映基坑开挖的变形性状。

从图 7 中可以看出，由于使用短支架使第一层的

开挖深度增加了 2.25 m, 连续墙的水平变形值有了较大幅度的增加。当基坑开挖至坑底设计标高, 设置斜抛撑和不设斜抛撑时连续墙的最大水平位移分别为 22.6 mm 和 27.3 mm。其中一、二级基坑的连续墙最大允许水平位移分别为 23.8 mm ($0.14\%H$) 和 51 mm ($0.3\%H$), 可见设置斜抛撑时连续墙的最大水平位移满足一级基坑的环境保护要求, 而不设斜抛撑时连续墙的最大水平位移只能满足二级基坑的环境保护要求。

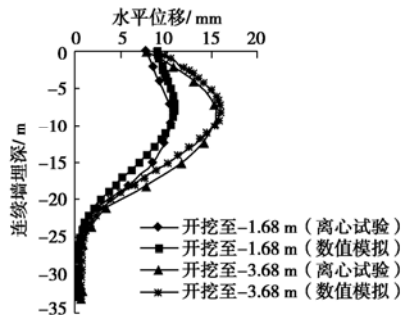
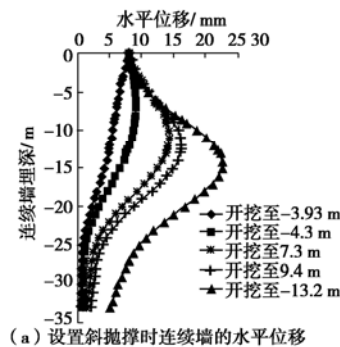
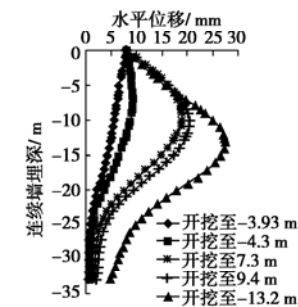


图6 连续墙水平位移的离心试验与数值模拟结果对比

Fig. 6 Comparison of horizontal displacements of diaphragm walls obtained from centrifuge tests and numerical simulation



(a) 设置斜抛撑时连续墙的水平位移



(b) 不设斜抛撑时连续墙的水平位移

图7 连续墙水平位移曲线对比

Fig. 7 Comparison of horizontal displacements of diaphragm wall

4 结 论

(1) 斜抛撑的存在有利于控制连续墙的变形。设置斜抛撑和不设斜抛撑情况下, 当基坑开挖至坑底时, 连续墙的最大水平位移相差 4.7 mm。根据本基坑的环境

保护等级, 建议在基坑东侧设置斜抛撑, 而在基坑西侧可不设置斜抛撑。

(2) 中板预留土台纵向开挖宽度对连续墙的变形影响较大, 底板预留土台纵向开挖宽度对连续墙的变形影响较小。建议本工程施工过程中中板处预留土台的纵向开挖宽度为 10 m, 底板处预留土台纵向开挖宽度为 20 m。

(3) 在本工程逆作法施工中, 按照边开挖边及时施作支撑的原则, 在开挖底板预留土台时, 由于中板已形成封闭的结构体系以及底板处斜抛撑的存在, 有效地控制了连续墙的水平变形。

参考文献:

- [1] 徐营营, 徐中华, 王建华, 等. 采用逆作法的超大型深基坑三维有限元分析[J]. 地下空间与工程学报, 2005, 1(5): 789 - 792. (XU Ying-ying, XU Zhong-hua, WANG Jian-hua, et al. Three-dimensional FEM analysis of a specially big and deep excavation using top-down method[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2005, 1(5): 789 - 792. (in Chinese))
- [2] 杨国伟, 王如路, 刘建航. 时空效应规律在深基坑施工中的应用[J]. 地下工程与隧道, 2000(4): 41 - 45. (YANG Guo-wei, WANG Ru-lu, LIU Jian-hang. The application of time-space effect rule in deep excavation[J]. Underground Engineering and Tunnels, 2000(4): 41 - 45. (in Chinese))
- [3] 刘艳, 刘国彬, 孙晓玲, 等. 考虑时空效应的软土地区深基坑变形分析[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(增): 1433 - 1436. (LIU Yan, LIU Guo-bin, SUN Xiao-ling, et al. Analysis of deformation laws by using the rule of time-space effect in soft soil excavation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(S): 1433 - 1436. (in Chinese))
- [4] 范庆国, 赵锡宏. 深基坑工程逆作法的理论与计算[J]. 岩土力学, 2006, 27(12): 2169 - 2176. (FAN Qing-guo, ZHAO Xi-hong. Theory and computation of up-down construction method for deep excavation engineering[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(12): 2169 - 2176. (in Chinese))
- [5] 包旭范, 庄丽, 吕培林. 大型软土基坑中心岛法施工中土台预留宽度的研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(10): 1208 - 1212. (BAO Xu-fan, ZHUANG Li, LÜ Pei-lin. Study on mound width remained during the construction of central island for large foundation pits in soft soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(10): 1208 - 1212. (in Chinese))
- [6] 庄丽, 周顺华, 宫全美, 等. 大面积软土基坑放坡开挖引起蠕变的数值分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增

- 2): 4209 - 4214. (ZHUANG Li, ZHOU Shun-hua, GONG Quan-mei, et al. Numerical analysis of creep induced by excavating slope in soft soil pit with large area[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, **25**(S2): 4209 - 4214. (in Chinese))
- [7] 孙洋波, 袁聚云, 赵宏锡. 逆作法施工盆式开挖预留土体坡肩宽度的研究[J]. 地下空间与工程学报, 2006, **2**(5): 789 - 792. (SUN Yang-bo, YUAN Ju-yun, ZHAO Hong-xi. A study on obligating width of soil slope shoulder in basin opening for top-down construction method[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2006, **2**(5): 789 - 792. (in Chinese))
- [8] 王美华, 季 房. 超大面积深基坑逆作法施工技术的探讨[J]. 地下空间, 2005, **1**(4): 599 - 602. (WANG Mei-hua, JI Fang. Discussion on the construction techniques of oversized excavation pit constructed by top-down method[J]. Underground Space, 2005, **1**(4): 599 - 602. (in Chinese))
- [9] 袁聚云, 吴 权, 艾智勇. 逆作法基坑围护的变形及邻近建筑沉降实测分析[J]. 地下空间, 2004, **24**(1): 44 - 47. (YUAN Ju-yun, WU Quan, AI Zhi-yong. Analysis on deformation of foundation pit enclosure and settlement of neighboring building in case of top-down technology[J]. Underground Space, 2004, **24**(1): 44 - 47. (in Chinese))
- [10] 朱宪辉, 汪贵平, 顾倩燕. 逆作法深基坑在超高层建筑中的设计应用[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(增): 1565 - 1568. (ZHU Xian-hui, WANG Gui-ping, GU Qian-yan. Design and practices of deep foundation pits of towering buildings constructed by top-down method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(S): 1565 - 1568. (in Chinese))
- [11] 刘建航, 侯学渊. 基坑工程手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997. (LIU Jian-hang, HOU Xue-yuan. The handbook of foundation engineering[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1997. (in Chinese))
- [12] 杨龙才, 王炳龙, 周顺华, 等. 基坑边坡变形和稳定性的离心试验研究[J]. 上海铁道大学学报, 2000, **21**(10): 100 - 105. (YANG Long-cai, WANG Bing-long, ZHOU Shun-hua, et al. Centrifugal model test for deformation and stability of pit slope[J]. Journal of Shanghai Tiedao University, 2000, **21**(10): 100 - 105. (in Chinese))
- [13] 李惠平, 范庆国, 夏明耀. 基床系数时间效应的三维分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 1999, **27**(6): 648 - 651. (LI Hui-ping, FAN Qing-guo, XIA Ming-yao. Three-dimensional analysis of time-depending about foundation modulus[J]. Journal of Tongji University (Natural Sciences), 1999, **27**(6): 648 - 651. (in Chinese))