

移动支护技术及其在城市地下工程中的应用前景

王秀英¹, 谭忠盛¹, 杨积凯², 郑维翰¹

(1. 北京交通大学土木建筑工程学院, 北京 100044; 2. 北京首尔工程技术有限公司, 北京 100192)

摘要: 城市空间的集约化发展为地下工程发展提供了良好的发展机遇, 同时也对地下工程建设技术提出了更高的要求。本文结合盾构法和浅埋暗挖法, 提出了一种适用于软土隧道的移动支护技术, 并研究了其对地层变形的控制作用, 数值分析和现场试验研究表明该技术具有很好的控制地层变形的作用。该技术在城市近距离穿越工程和对地表沉降控制严格地区的隧道施工中具有显著的优势, 值得应用和推广。

关键词: 移动支护; 地层变形; 应用前景; 数值模拟; 现场监测

中图分类号: TU94⁺2 **文献标识码:** A

Mobile Support Technology and Its Application Prospects in Urban Underground Engineering

Wang Xiuying¹, Tan Zhongsheng¹, Yang Jikai², Zheng Weihan¹

(1. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. Beijing SHOUER Engineering Co., Ltd., Beijing 100192, China)

Abstract: The intensive development of urban space provides a good opportunity for the development of underground engineering. At the same time, it also demands higher requirements in terms of underground construction technology. In this paper, combined with the advantages of the shield method and shallow tunneling method, a mobile support technology suitable for soft soil tunneling is proposed, and its control effect on ground deformation is also studied. Numerical analysis and field tests show that this technique has a strong ability to control ground deformation. This technique has remarkable advantages in urban short-distance crossing engineering and tunnel construction in districts where there is a strict surface subsidence demand, and as such, it is worth applying and popularizing.

Keywords: mobile support; ground deformation; application prospect; numerical simulation; site monitoring

一、前言

当前, 我国城市地下空间的建设进入大发展时期, 全国的大中城市都开始进行地铁建设和规划。

同时, 城市市政设施、人防工程、地下管网也需要不断改造和建设。我国城市大多处于第四纪地层, 地层软弱且地面环境复杂, 由于地下工程埋深、规模、结构及功能的多样性, 所处地面环境、地下地

收稿日期: 2017-11-18; 修回日期: 2017-12-20

通讯作者: 王秀英, 北京交通大学, 副教授, 博士生导师, 主要研究方向为隧道及地下工程建设; E-mail: xywang1@bjtu.edu.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“城市地下空间开发规划战略研究”(2015-XZ-16)

本刊网址: www.enginsci.cn

质条件的差异以及对施工影响控制要求的不同，隧道建设者们研究了多样化的地下工程施工方法，我国在地下工程建设上取得了辉煌的成就 [1,2]。然而，随着对我国地下空间的深入开发，隧道建设遇到的复杂地质条件和地面环境问题日益突出，同时劳动力匮乏的问题也逐渐显现，针对目前隧道建设的难题，发展多样化的软弱围岩隧道机械化施工方法已经成为我国隧道建设的迫切需求 [3]。因此，本文提出了一种针对软弱围岩隧道施工的移动支护技术，研究其对地层变形的控制作用，并探讨了该技术在城市地下工程中的应用前景。

二、移动支护技术简介

移动支护技术是针对软弱围岩隧道而研发的一种机械化施工技术，结合盾构法在盾壳保护下施工的理念和浅埋暗挖法自由灵活处理复杂多变地质的特点，并借鉴水平旋喷法和国外预切槽法的思路，在其基础上创新研发而成的技术。该技术通过在开

挖面前方形成封闭的超前预支护，实现在软弱地层的全断面开挖，克服了预切槽法采用混凝土进行喷灌及槽段横向不连续的缺陷，通过掘进箱体可以在开挖面前方形成具有足够刚度且横向连接完好的预支护，下部土体开挖可以在预支护保护下进行大断面机械开挖，不仅提高了施工的安全性，而且也可以大大提升施工效率。移动支护设备结构示意图如图1所示。移动支护的施工过程示意图如图2所示。

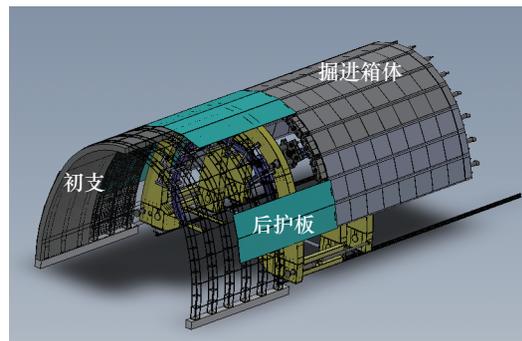


图1 移动支护设备结构示意图

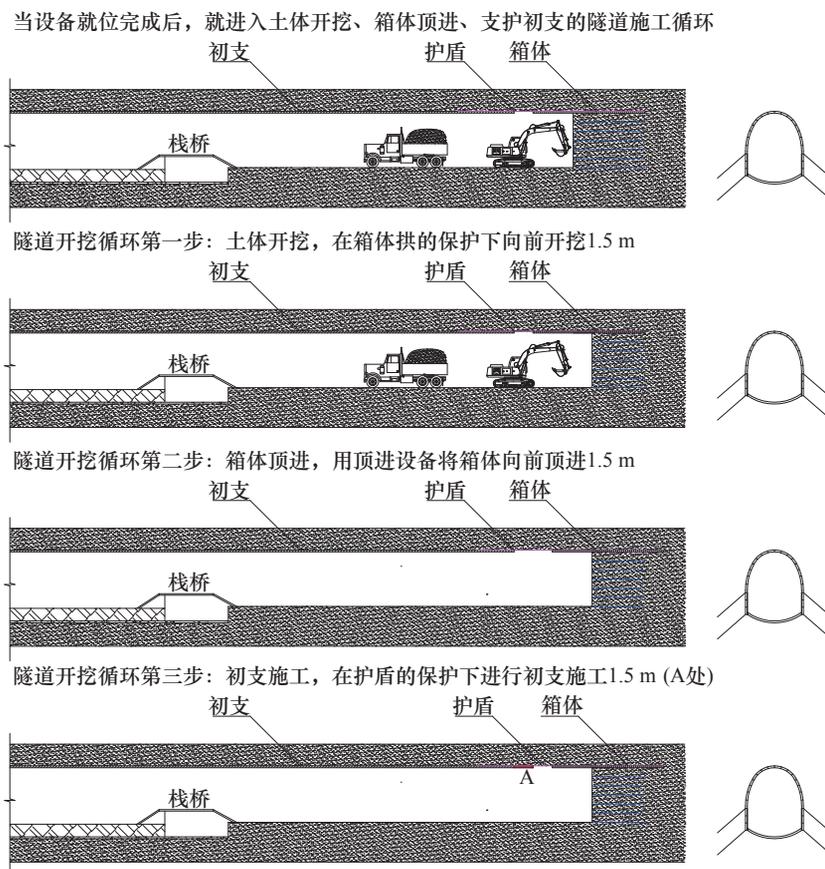


图2 移动支护施工过程示意图

移动支护设备结构的基本单元包括可以自行掘进的箱体及箱体后部连接的护板，各掘进箱体和后护板之间相互咬合形成拱形结构，结构体内有可移动的支撑拱架。相互咬合的掘进箱体组深入隧道掌子面，为隧道开挖提供保护，隧道的衬砌支护是在互锁的后护板下进行。在移动支护保护下的隧道施工可以简单分为三个步序：箱体掘进、土体开挖和衬砌支护，三个步序不断循环直至隧道施工完成。移动支护设备开挖隧道施工流程如图3所示。

三、移动支护法引起的地层变形分析

(一) 试验概况

本次试验所使用的移动支护结构由13个8800 mm×1000 mm×350 mm（长×宽×高）的掘进箱体组成，咬合结构采用了简单的钢管开槽加连接轴结构，13个掘进箱体在隧道拱部形成保护。

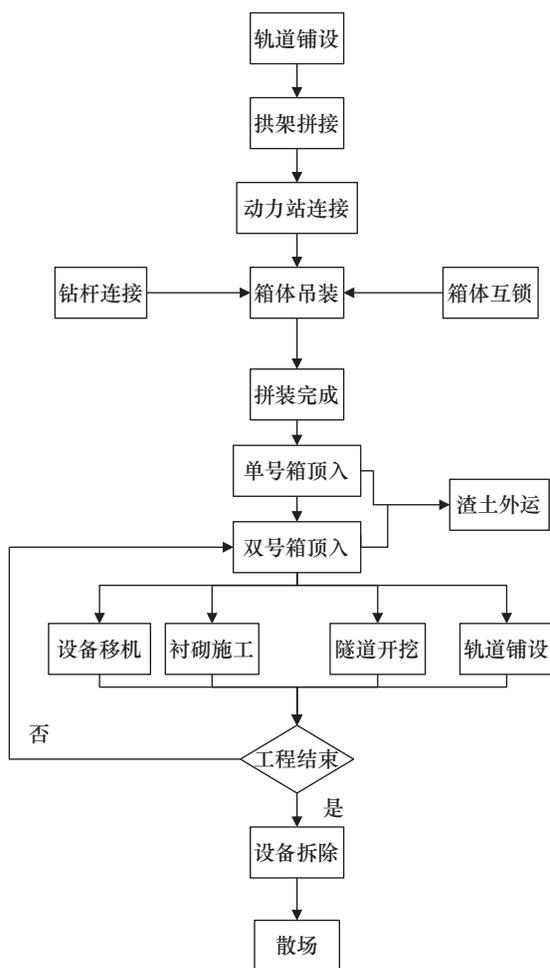


图3 移动支护设备开挖隧道施工流程图

本次试验场地地质条件为原始耕地，施工部位在地表以下0~3 m，施工长度约为30 m，进口位置埋深为0，出口位置埋深为3 m。由于上覆荷载小，没有进行仰拱施工。现场施工如图4所示。

本次试验初支采用拼装式钢波纹板支护结构，拼装式钢波纹板是一种将工厂预制的波纹钢板在施工现场快速拼接而形成的空间薄壳柔性承载结构[4]。管片间拼接处采用高强螺栓连接，钢板表面常采用热浸镀锌（铝）处理，拼装完成后，拼接边缝及螺栓用密封胶处理并在内外表面涂上沥青。热浸镀锌和外表面喷涂沥青均可防腐，用密封胶处理焊缝、喷涂沥青可以起到防水作用。具体如图5所示。

(二) 地层变形分析

1. 计算模型及参数选取

利用MIDAS/GTS数值模拟软件对拱部开挖、拱部支护以及核心土的开挖进行模拟，计算模型横



图4 移动支护结构法现场施工图



图5 钢波纹板拼装示意图

向长 58 m，高 37 m，埋深 0~3 m，纵向长 30 m，开挖每步为 2 m。土层采用摩尔-库仑模型，后护板支护以及钢波纹管初支采用弹性本构模型，进行地表沉降、拱顶沉降以及周边收敛的分析 [5]。计算模型如图 6 所示。

根据现场实测地层情况，选取 V 级围岩计算参数，见表 1。

2. 计算模拟及分析方案

为了使数值模拟与现场实际施做顺序一致，将整个过程分为 34 步，其中箱体纵向每次开挖 2 m，箱体开挖 10 m 后开挖核心土部分，并在后护板的

保护下施做拼装式钢波纹管初支，每次施做 2 m。

分别取 $y=8$ 、 $y=15$ 、 $y=22$ 断面上的测点，监测这三个断面上的地表沉降、拱顶沉降以及周边收敛随施工的变化，测点布置情况如图 7、图 8 所示。

3. 计算结果分析

(1) 地表沉降分析

经过模拟计算，得出移动支护结构法在施工完成后的地表沉降云图如图 9 所示。

9 个地表沉降测点随施工步序沉降变化图如图 10~12 所示，图中施工步序 1~5 为模拟箱体推进，5~30 为核心土开挖，30 步以后为模拟拼装钢波纹管

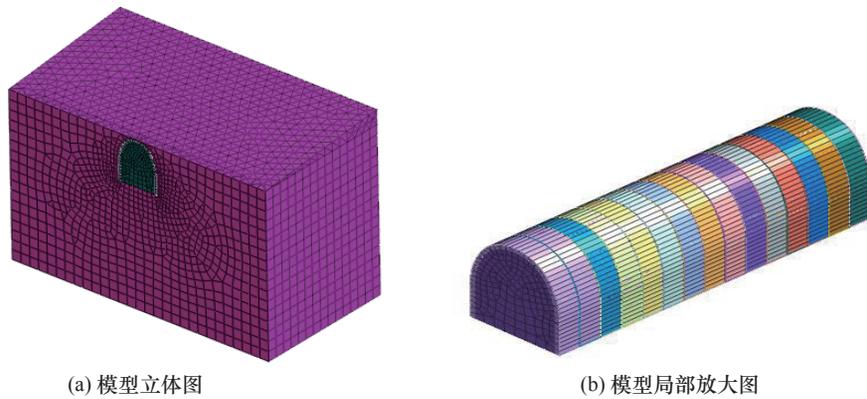


图 6 计算模型

表 1 计算模型参数表

材料类别	弹性模量 E/MPa	泊松比 μ	容重 γ $/(\text{kN}/\text{m}^3)$	粘聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/^\circ$
土层	200	0.35	16.5	200	25
后护板	320 600	0.3	78.9	—	—
钢波纹管初支	309 000	0.3	88	—	—

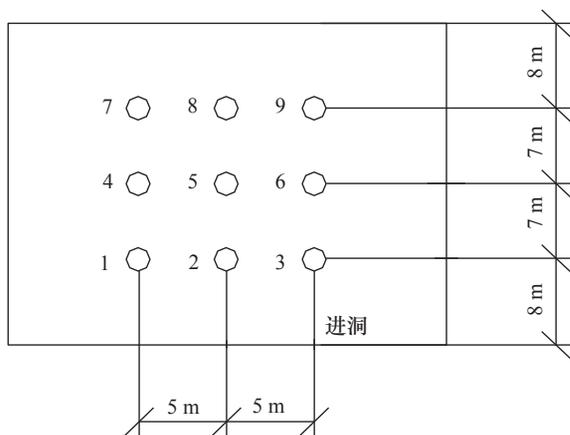


图 7 地表测点图

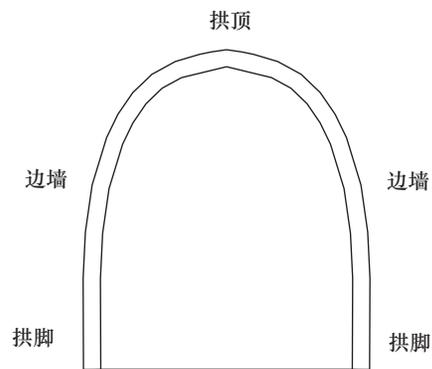


图 8 拱顶沉降及周边收敛测点图

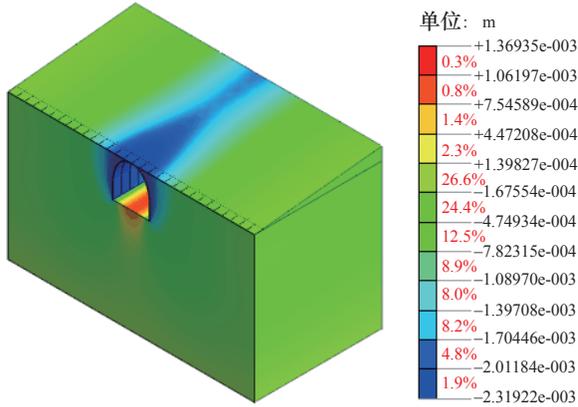


图9 移动支护结构法在开挖完成后的地表沉降云图

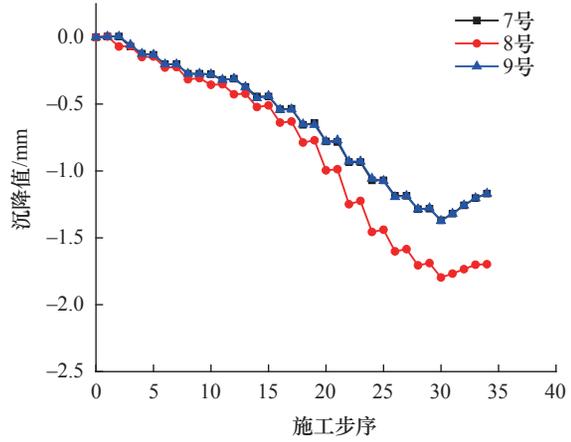


图12 7~9号测点随施工变化的沉降图

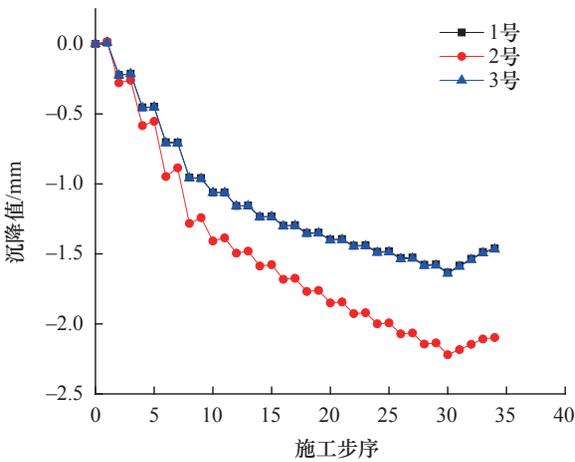


图10 1~3号测点随施工变化的沉降图

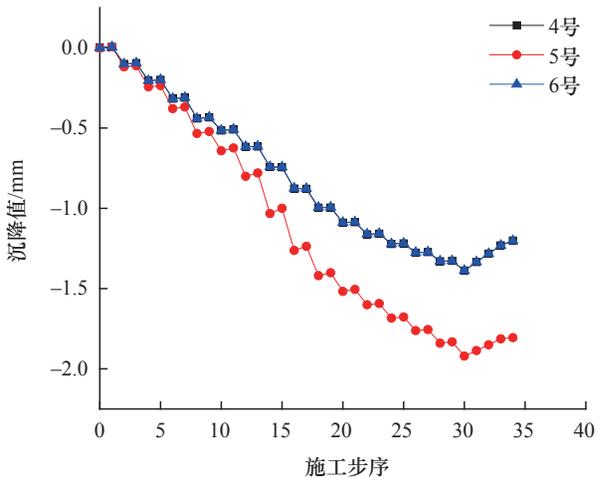


图11 4~6号测点随施工变化的沉降图

管。地表9个测点的沉降影响见表2。

由图10~12和表2可以看出，在隧道开挖过程中，地表沉降随施工过程逐步加大，拱顶上方地表沉降测点沉降值明显大于两侧地表测点，且在开挖

表2 地表沉降情况

测点	1号	2号	3号	4号	5号	6号	7号	8号	9号
沉降值/mm	1.63	2.22	1.64	1.39	1.92	1.39	1.38	1.79	1.38

核心土时地表沉降加大而在施做拼装式钢波纹管初支时沉降减小。在应用移动支护结构法开挖时最中间3个测点（即2、5、8号测点）沉降值较大，最大沉降值（2号测点）可达到2.22 mm，而两侧测点沉降值较小，沉降值大约在1.38~1.63 mm，埋深较浅的1、2、3号测点沉降较大，埋深较大的7、8、9号测点沉降较小。同时由表2可以看出，核心土开挖时造成的拱顶沉降较大，而拼装式钢波纹管初支的施做对地表沉降有明显的抑制作用。表3给出了试验现场测得的沉降情况。

由表3可见，实际测得地表中线各点的地表沉降值最大为5 mm，由此可见，移动支护法在浅覆土情况下引起的地表沉降是非常小的。

四、移动支护技术在城市地下工程中的应用前景分析

（一）移动支护法的特点

1. 隧道断面适应性强

移动支护主要是由拱架支撑的箱体起到超前支护的效果，而箱体可以灵活调整组合方式，从而适应多种形状的隧道断面，如方形、圆形、椭圆形、马蹄形等，增强了其断面适应性。

2. 自动化程度高

移动支护具有自动化控制系统，由行程传感器、压力传感器、转速传感器等采集设备的实时状态，

表3 各测点沉降数值

时间	测点沉降值/mm								
	1号	2号	3号	4号	5号	6号	7号	8号	9号
12月6日	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12月7日	0	1	0	0	0	0	1	0	1
12月9日	-1	1	1	-2	-2	-1	0	-1	0
12月12日	0	0	1	-2	-3	-1	-3	-2	-1
12月13日	0	1	0	-2	-3	-1	-2	-2	0
12月14日	0	1	0	-3	-3	-2	-3	-1	-1
12月16日	0	0	0	-3	-3	-1	-3	-3	-2
12月23日	-1	0	-1	-5	-2	-2	-3	-3	-2
12月25日	-1	0	-2	-4	-4	-2	-4	-3	-2
12月29日	0	-1	-2	-5	-4	-2	-4	-3	-2
12月30日	0	-2	3	-5	-3	-2	-5	-2	-2

经过控制器处理后,由控制器按照现场设定的参数控制动力头自动钻孔。可以提高设备的自动化程度,提升施工效率。

3. 尾盾板保护

借鉴盾构机在盾尾内部拼装管片的功能,移动支护设备设置了尾盾板,尾盾板搭接在箱体和设备后部的混凝土结构上,在尾盾板的保护下进行混凝土结构的施工,与传统矿山法施工相比,施工的安全性得到了明显提升。

移动支护可以在箱体与箱体间设置锁扣装置,在不影响箱体推进的情况下将箱体与箱体可靠地连接起来,能有效地控制箱体位移,保证箱体在掘进过程中的整体性。由箱体组合成的拱壳,可以充分保证掌子面开挖的安全性,从而实现机械开挖;且施工设备构造简洁、易操作、体积较小、能耗低,对隧道后续的交叉和平行施工影响较小。与盾构法相比,移动支护法断面更为灵活、造价低,在空间较小的情况下可以倾斜进洞。

(二) 移动支护法应用前景展望

据统计,我国获批进行轨道交通建设的城市已经达到45个,据国家住房和城乡建设部的统计数据,截至2016年12月20日,全国有147个城市、28个县已累计开工建设城市地下综合管廊2005 km,城市地下空间的建设进入大发展时期。

与此同时,城市的集约化发展也对地下工程的建设提出了更高的要求,近几年,城市地下工程建设中可利用的施工场地正在不断减少,这一点在城

市建成区尤为突出[6]。场地占用成本和拆迁难度增大、交通导改和管线改移难度加大、施工噪音和扬尘被严格限制,另外,城市地下工程建设很多涉及到需要近距离穿越既有建(构)筑物。移动支护法由于有掘进箱体,能提前深入到开挖面前方,并在隧道外轮廓形成环形保护区,因此在近距离穿越工程中具有显著的优势,能大大减少开挖对周围地层及建(构)筑物的影响。同时,移动支护法机械化程度高,可以大大降低施工人员的劳动强度,可以在长度较短的穿越工程中采用。另外,移动支护法断面灵活,在城市综合管廊建设方面具有独特的优势,综合管廊断面形式以平顶直墙为主,而且埋深浅,移动支护法可以适应城市地下管廊断面变化的需要。

五、结论

本文通过数值计算和现场实测研究了移动支护技术对地层变形的控制作用,并对移动支护技术的特点进行了分析,研究表明:

(1) 移动支护技术即使在浅覆土情况下引起的地表沉降也是相当小的,因此该技术具有良好的控制地层变形的能力。

(2) 移动支护技术断面适应性强,施工安全性高,适用于城市地下管廊断面变化的需要,具有倾斜进洞能力,可以满足建设空间受限情况下的地下工程建设,具备大力推广的必要性和可行性。

(3) 由于目前移动支护技术仅在工业化试验中

取得了成功，尚未形成系列工法，因此还需要在适用性、结构受力机理及机械配套等方面展开研究，选择合适的工点进行预设计和施工试验，并在此基础上不断完善，形成完备的移动支护施工技术。

参考文献

- [1] 王梦恕. 地下工程浅埋暗挖技术通论 [M]. 合肥: 安徽教育出版社, 2005.
Wang M S. General theory on shallow buried excavation technology of underground engineering [M]. Hefei: Anhui Education Press, 2005.
- [2] 王梦恕. 中国盾构和掘进机隧道技术现状、存在的问题及发展思路 [J]. 隧道建设. 2014, 34(3): 179-187.
Wang M S. Tunneling by TBM/shield in China: State-of-art, problems and proposals [J]. Tunnel Construction. 2014, 34 (3): 179-187
- [3] 王秀英, 刘维宁, 赵伯明, 等. 预切槽技术及其应用中的关键技术问题 [J]. 现代隧道技术. 2011(3): 22-27.
Wang X Y, Liu W N, Zhao B M, et al. Pre-cutting method and its key techniques in application [J]. Modern Tunnelling Technology. 2011 (3): 22-27.
- [4] 冯芝茂. 覆土波纹钢板桥涵土与结构相互作用分析及设计方法研究(硕士学位论文) [D]. 北京: 北京交通大学, 2009.
Feng Z M. Soil-structure interaction analysis and design method study of buried corrugated steel bridges (Master's thesis) [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2009.
- [5] 王秀英. 移动支护技术引起的地层变形分析[R]. 北京: 北京交通大学, 2017.
Wang X Y. Analysis of ground deformation caused by mobile support technology [R]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2017.
- [6] 李宏安. 大直径盾构建造地铁区间及扩挖车站工程实践及应用前景分析 [J]. 现代隧道技术. 2015, 52(5): 16-23.
Li H A. Application and prospect analysis of large-diameter shield-driven tunnels combined with enlarged metro stations [J]. Modern Tunneling Technology, 2015, 52 (5): 16-23.