

DOI: 10.11779/CJGE20230236

# 基于大刚度支护体系的新型暗挖技术

聂子云<sup>1</sup>, 谭小兵<sup>1</sup>, 朱占国<sup>1</sup>, 关永平<sup>2</sup>

(1. 中国铁路设计集团有限公司, 天津 300251; 2. 台州市交通投资集团有限公司, 浙江 台州 318000)

**摘要:** 传统暗挖技术存在施工风险大、施工效率低、对周边环境影响大、工程投资大等问题, 很难适用于软弱地层或复杂环境下大型地下结构暗挖施工。为解决以上问题, 提出一种基于大刚度支护体系的新型暗挖技术。新型暗挖技术利用纵向管幕、顶横梁和中间立柱构筑大刚度支护体系, 支护体系各构件通过非开挖方式或者在管幕保护下利用小空间构筑, 保证施工安全的同时, 防止地层出现较大应力释放, 支护体系构筑完成后即可进行大面积暗挖施工。新型暗挖技术工序简单、施工效率高、风险低、对周边环境影响小、工程投资小。数值分析和工程实例验证了新型暗挖技术的可行性和实用性, 新技术为大型地下结构暗挖技术提供了新的思路。

**关键词:** 大型地下结构; 暗挖; 大刚度支护体系; 数值分析

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2024)06-1332-07

作者简介: 聂子云(1987—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事隧道及岩土工程方面设计和科研工作。E-mail: nieziyun2011@163.com。

## A new underground excavation method based on large rigidity support system

NIE Ziyun<sup>1</sup>, TAN Xiaobing<sup>1</sup>, ZHU Zhanguo<sup>1</sup>, GUAN Yongping<sup>2</sup>

(1. China Railway Design Corporation, Tianjin 300251, China; 2. Taizhou Transportation Investment Group, Taizhou 318000, China)

**Abstract:** The traditional underground excavation method has problems such as high risk, low efficiency, great impact on the surrounding environments and large investment. It is difficult to construct large underground structures in soft strata or complex environments. In order to solve these problems, a new underground excavation method based on the large rigidity support system is proposed. The pipe roof, horizontal beam and vertical column are used to construct a large rigidity support system, and each component is constructed by using the non-excavation method or constructed in a small space under the protection of pipe roof, which ensures the construction safety and prevents the stress release of the stratum. After the support system is constructed, bulk excavation can be carried out. The new underground excavation method has the advantages of simple process, high efficiency, low risk, small impact on the surrounding environments and small investment. Numerical analysis and engineering examples verify the feasibility and practicability of the new method, which provides a new idea for the construction of large underground structures.

**Key words:** large underground structure; underground excavation; large rigidity support system; numerical analysis

## 0 引言

目前中国第四纪土层中大型地下结构的主要暗挖施工方法有分部开挖法、洞桩法和管幕法。

分部开挖法是将大断面结构分解为若干个小断面, 随小断面的开挖逐段封闭成环形成。常用的大型地下结构分部开挖法有中洞法<sup>[1]</sup>、侧洞法和柱洞法等。分部开挖法开挖分块多, 工序复杂, 工期长; 地层反复被扰动, 地面沉降和施工风险大; 初支与二衬间受力转换频繁, 辅助措施多, 初期支护废弃量大; 二衬施工缝较多, 结构整体性和防水效果差。

洞桩法(PBA工法)<sup>[2]</sup>是在分部开挖法的基础上, 结合盖挖法的理念发展而来。该工法采用分部开挖法

施作拱部结构, 在拱盖保护下进行后期的土方开挖和二衬施工。该工法侧部采用边桩围护, 部分改进了分部开挖法的问题。不过该工法拱部结构仍采用分部开挖法, 初支、二衬扣拱风险大, 难以用于软弱地层或复杂环境下大型地下结构的修建。

中国在上海、北京、台湾、深圳等地有采用管幕+箱涵顶进<sup>[3]</sup>或者管幕+随挖随撑<sup>[4-5]</sup>工法修建大跨地下结构的案例。箱涵顶进法施工精度要求高, 地表沉降控制一般不理想; 随挖随撑方案通常要辅以大范围地层加固、分仓开挖, 一般只适合修建单层地下结构。

港珠澳大桥北隧道<sup>[6]</sup>在管幕+随挖随撑基础上辅以管间冻结在饱和软土中成功实施了双层地下结构,但是该工程跨度较小、造价高昂。近年来,中国引进了国外管幕工法—管幕预筑法<sup>[7]</sup>和STS管幕工法<sup>[8]</sup>用于地铁车站建设,该类工法相对传统暗挖安全系数高、可以缩短工期,不过该类工法管幕需横向连接,存在工序复杂、管内人工作业强度大、管幕直径大、工程投资大等问题。管幕类工法不具有普遍适用性。

为解决目前大型地下结构暗挖工法存在的不足,并解决软弱地层或复杂环境下难以暗挖的问题,提出了一种基于大刚度支护体系的新型暗挖技术。

## 1 暗挖技术新思路及技术关键

### 1.1 暗挖技术新思路

如图1,2所示,暗挖工程和基坑工程均是进行超前支护(基坑工程采用桩墙等围护结构、暗挖工程采用小导管或管棚+注浆加固超前支护)后,先支撑(基坑工程采用内支撑+腰梁、暗挖工程采用格栅拱架)后开挖。从地下空间利用和施工手段来说,除开挖方向不同外,并无本质区别,暗挖工程如同水平方向的基坑工程。

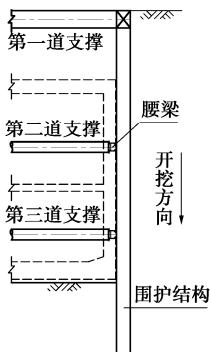


图1 基坑支护剖面

Fig. 1 Support of foundation pit

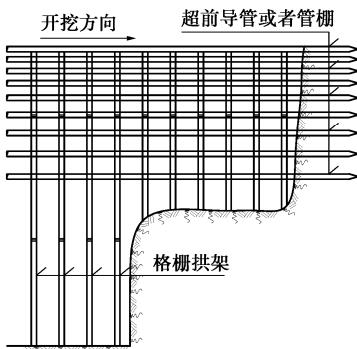


图2 暗挖支护剖面

Fig. 2 Support of underground excavation

暗挖工程和基坑工程的不同点在于:基坑工程围护结构和内支撑刚度大,可以做到支撑间距大、施工

风险低、施工速度快、工程造价低;传统暗挖法超前支护和支撑刚度小,需充分利用地层的自承能力,并做到随挖随撑,导致其存在开挖面分部多、施工风险高、环境变形控制难度大、支护密集、工效低、造价高等问题。

如图3所示,将基坑工程的大刚度支护体系沿水平方向应用于暗挖工程,纵向“围护结构”作为上方土体的超前支护,与横向“腰梁”和竖向“内支撑”共同组成大刚度支护体系后,再进行暗挖施工作业,暗挖便能实现“大跨、安全、高效和廉价”的目标。

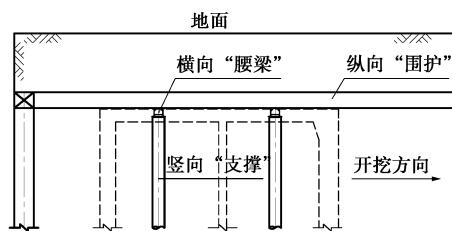


图3 大刚度支护体系暗挖思路

Fig. 3 Underground excavation based on large rigidity support

### 1.2 新型暗挖技术关键

根据上述暗挖技术新思路,基于大刚度支护体系的新型暗挖技术关键在于:在土方大开挖前,采取有效手段,在不明显扰动土层的情况下,完成大刚度支护体系的构筑。

基于当前工程技术水平,纵向“围护结构”首选采用管幕,管幕承载能力和抗弯刚度突出,采用顶管方式实施,可以实现非开挖作业和确保施工安全。

横向“腰梁”和竖向“内支撑”可以结合主体结构梁、柱设置,也可采用临时钢结构;前者可以充分利用钢筋混凝土结构刚度大的特性,又减少了受力转换;后者可以施加预应力,达到主动控制变形的效果。横向“腰梁”和竖向“内支撑”施工空间的大小直接影响上方纵向“围护”的承载跨度和地表沉降大小,为了降低该施工空间的影响范围,横向“腰梁”和竖向“内支撑”可通过设置横向小导洞实施,条件允许下,竖向“内支撑”也可以在地面施工。下面结合设计方案进行阐述。

### 1.3 设计方案

以一个标准地下二层地铁车站为例,车站横断面和支护纵剖面见图4,5。车站采用平顶直墙结构,沿车站顶板和部分侧墙结构外轮廓设置管幕作为纵向“围护”,结构设置顶横梁作为横向“腰梁”、结构钢管柱(含桩基)作为竖向“支撑”。管幕通过车站两端的浅基坑或者暗挖通道施工,钢管柱(含桩基)有条件时在地面施工,顶横梁在管幕下的横向导洞内施工。主要施工步序见图6。

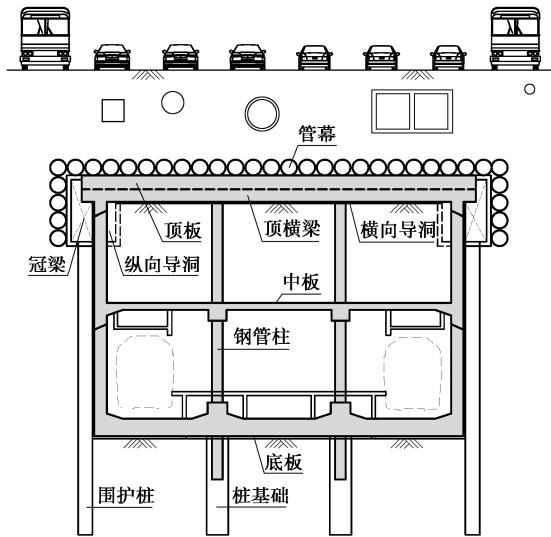


图 4 新型暗挖技术支护横剖面

Fig. 4 Cross profile of new support system

当受上方环境条件制约,如结构上方存在轨道交通、高速公路、机场、重要建筑物等情况,不能从地面进行中间桩柱施工时,钢管柱(含桩基)可转入管幕下的横向导洞内施工,见图7。当受下方环境条件制

约,如结构下方存在既有地下构筑物或规划工程而不能施作钢管柱桩基时,可设置下层纵向导洞施工条形基础作为围护桩和钢管柱的基础,见图8。

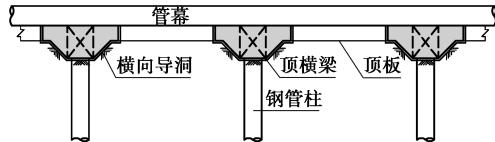


图 5 新型暗挖技术支护纵剖面

Fig. 5 Longitudinal profile of new support system

与传统暗挖工法相比,新型暗挖技术支护体系计算理论清晰,不依赖工程经验;支护构件在地面或在管幕保护下完成,覆土要求不深;支护体系施工工作面较浅,无开马头门、扣拱作业,施工风险大幅降低;顶横梁完成后即可大断面开挖,工序简单,机械化作业程度高,施工速度快;工程废弃量少,工程造价低。

与目前管幕法相比,仅在顶部设置少量管幕,充分利用了管幕纵向刚度,管幕尺寸较小,管幕施工对土体扰动相对较小,工程废弃量少,工程造价低;管幕间无横向连接要求,无需管内人工作业,避免了目

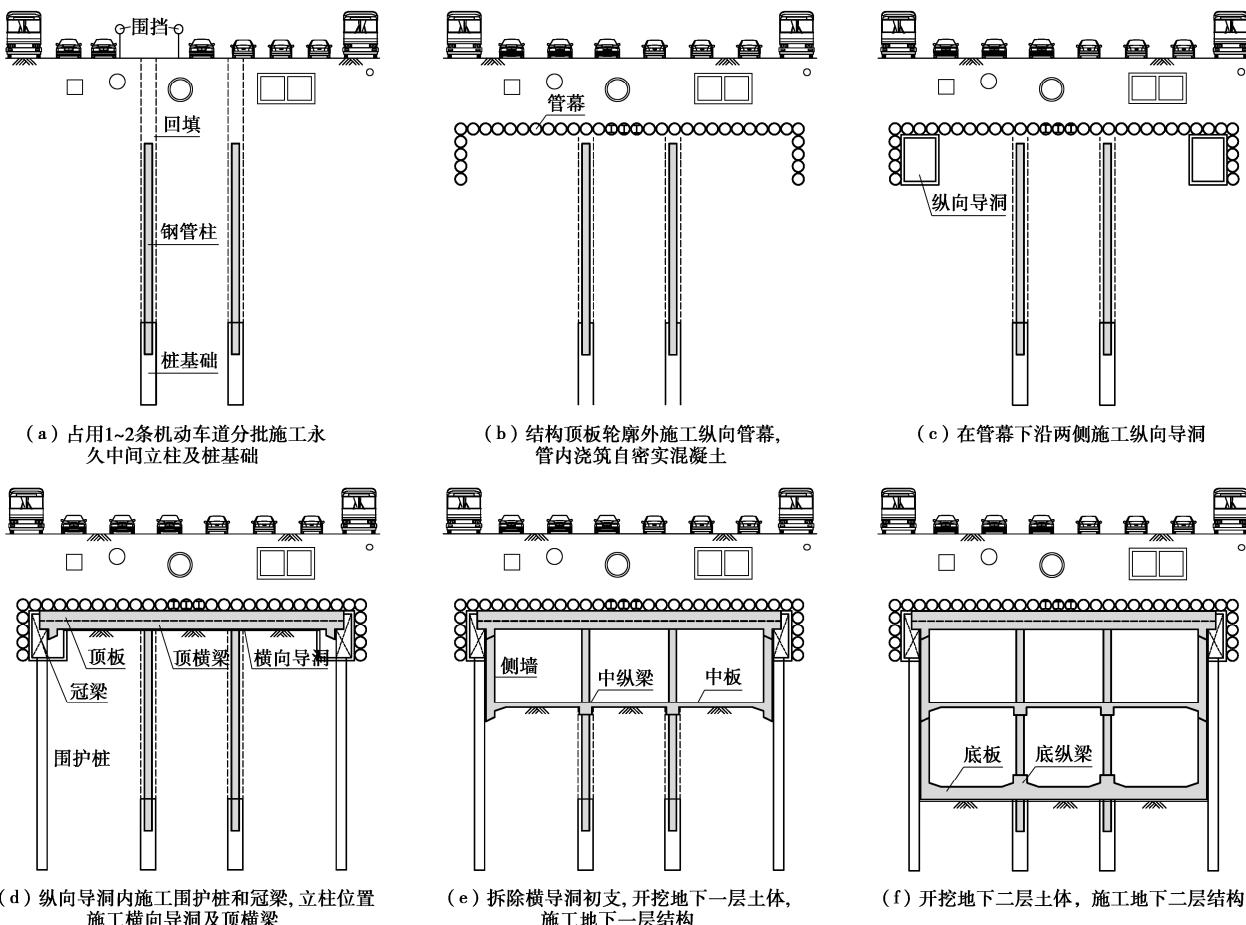


图 6 主要施工步序

Fig. 6 Main construction steps of new underground excavation method

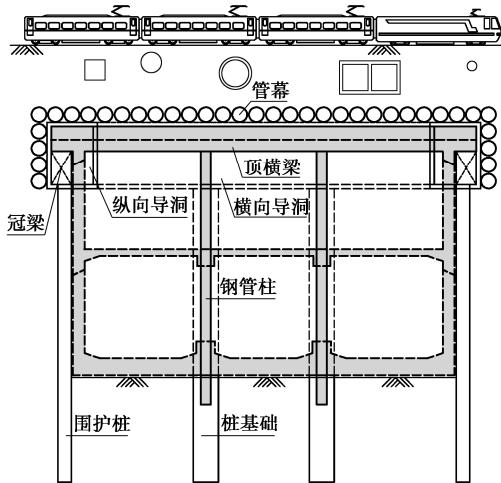


图 7 中间立柱在横导洞内施工

Fig.7 Column construction in miniature tunnel

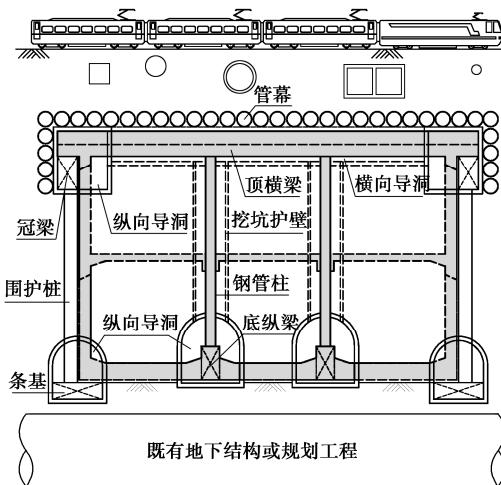


图 8 中间立柱下设置条形基础

Fig. 8 Column construction on strip foundation

前管幕工法中钢管顶进精度要求高、施工速度慢、施工环境恶劣、人工劳动强度大等问题。

## 2 数值分析

以一个标准二层地下车站为例, 车站覆土4 m, 底板埋深19 m, 车站宽约23 m; 管幕采用Φ800@1000 mm钢管; 边桩采用Φ800@1200 mm钻孔桩; 纵向导洞宽3.5 m×高4.0 m, 横向导洞宽3.5 m×高3 m; 中立柱采用直径800 mm纵向间距8 m钢管混凝土柱, 人工挖孔直径1.8 m; 顶横梁宽1.3 m×高1.6 m, 底纵梁宽1.3 m×高1.8 m。边桩下设置条形基础, 钢管柱以底纵梁为基础。

沈阳第四系土层地表以下一定深度为杂填土, 以下基本为砂层, 将地层简化为两层, 管幕及以上范围为填土层, 以下均为砂层。土层采用莫尔-库仑塑性本构模型, 结构采用线弹性模型, 土层力学参数取值见表1, 结构材料参数见表2。

表 1 土层力学参数

Table 1 Mechanical parameters of soils

土层	重度 $\gamma / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	泊松比 $\nu$	弹性模量 $E / \text{MPa}$	黏聚力 $c / \text{kPa}$	摩擦角 $\varphi / (^{\circ})$	侧压力系数 $K_0$
填土	20	0.30	10	10	10	0.43
砂层	20	0.29	50	2	33	0.34

表 2 支护体系结构材料参数

Table 2 Mechanical parameters of structures

名称	重度 $\gamma / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	泊松比 $\nu$	弹性模量 $E / \text{GPa}$
钢筋混凝土结构	25	0.2	28
管幕、钢管柱	78.5	0.2	200

计算模型尺寸为  $X100 \text{ m} \times Y55 \text{ m} \times Z50 \text{ m}$ , 整体模型和细部模型见图 9, 10。除地表采用自由表面, 前、后、左、右、底表面分别施加法向约束。

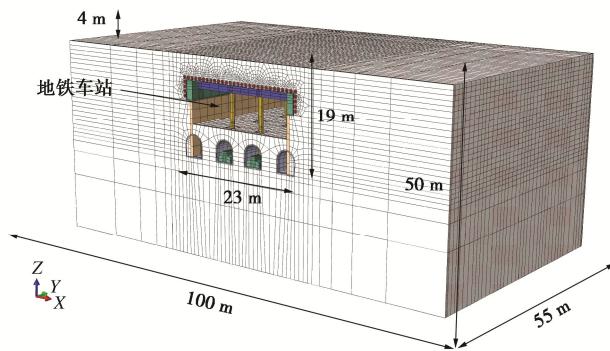


图 9 数值分析模型

Fig. 9 Numerical model

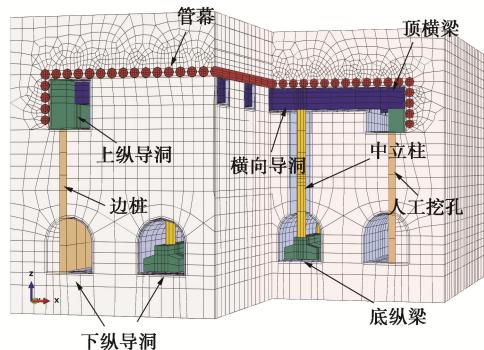


图 10 数值分析模型细部

Fig. 10 Details of numerical model

管幕施工引起地表沉降控制因素较多, 除了与地层及埋深有关, 与施工工艺、技术水平、现场管理等密切相关, 顶管施工引起沉降有小至 10 mm 之内<sup>[9]</sup>, 也有 50 mm 以上的<sup>[10]</sup>, 难以精确模拟。本文数值分析进行简化, 考虑顶管挖土应力释放 40% 后激活管幕模拟管幕施工对地层的影响。计算结果见图 11, 12。

根据数值计算结果, 得到 4 点结论。

(1) 新工法沉降累计约 30 mm, 新工法对地表沉降控制具有明显的优势。

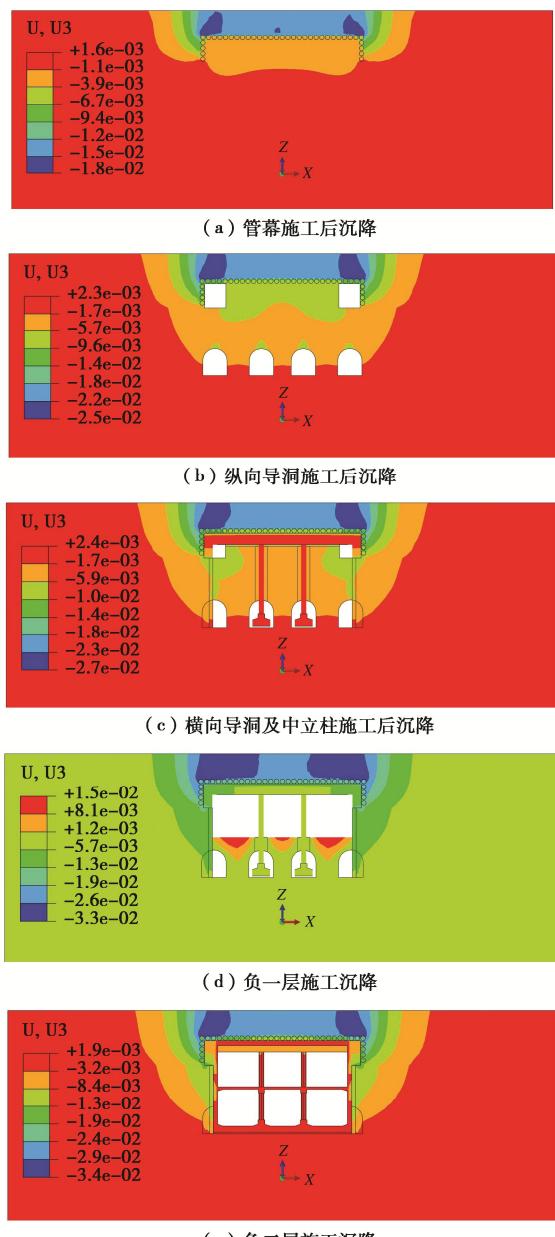


图 11 主要施工步序沉降云图

Fig. 11 Settlements of main construction step

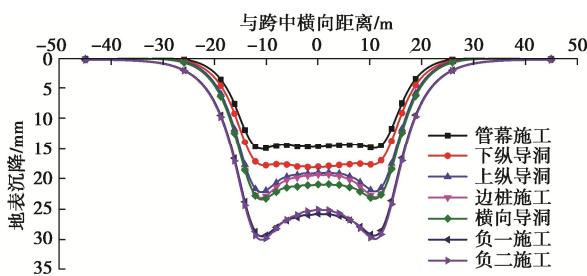


图 12 地表沉降曲线

Fig. 12 Curves of transverse settlement of ground

(2) 管幕施工引起地表沉降占累计值 50%，说明管幕施工是引起地表沉降的主要原因，施工过程应重点加强管幕施工沉降控制。

(3) 导洞施工 (下纵导洞→上纵导洞→边桩施工

→横向导洞) 引起地表沉降占累计值约 26.7%。

(4) 车站负一层施工引起地表沉降占累计值约 23.3%，基本发生在拆除横导洞初支过程；负二层施工对地表沉降基本无影响，大刚度支护体系构筑完成后，后续的大开挖作业地表沉降很小。

### 3 工程应用

沈阳地铁 4 号线市府大路站跨路口设置，车站下穿市府大路以及包含直径 1.2 m 供水管在内的十余条重要市政管线，图 13 为车站平面图。城市主干道和供水干管无法中断，跨路口段采用新型暗挖技术实施，暗挖段长度 47.5 m。车站为地下两层平顶直墙结构，覆土 4 m，结构跨度 25.2 m。2023 年 9 月投入运营。

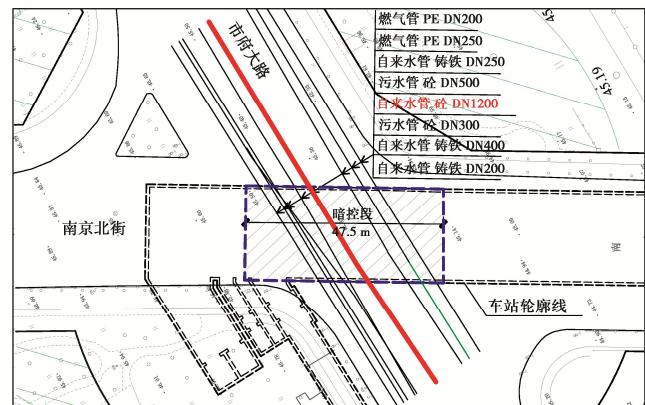


图 13 市府大路站平面

Fig. 13 Plan of Shifudada station

地层从上到下分别为杂填土、中粗砂、砾砂。管幕采用  $\Phi 402@450$  mm 钢管，管内填充自密实混凝土，边桩采用  $\Phi 1000@1500$  mm 人工挖孔桩，导洞宽 3~3.5 m，高 3.5~4.5 m，车站下方需预留规划地铁 7 号线下穿条件，设置下层导洞施工底纵梁、条基作为中立柱和边桩的基础，支护断面见图 14，施工现场见图 15。

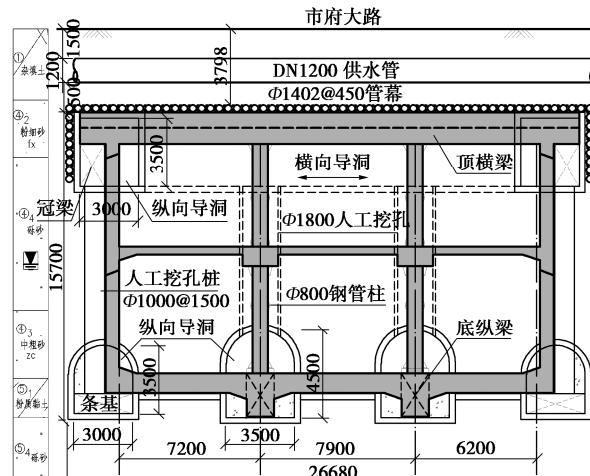


图 14 车站暗挖段横断面

Fig. 14 Cross profile of station



图 15 现场施工

Fig. 15 On-site construction

图 16 为管幕施工期间地表沉降测点布置平面, 图 17 为管幕施工期间地表沉降情况, 监测结果显示地表沉降基本控制在 20 mm 之内。部分钢管未能一次贯通, 需从另一端补顶, 对地层产生较大扰动, 导致附近地表沉降较大, 少数测点沉降超过 40 mm, 这与管幕部分位于杂填土范围且采用水平螺旋钻机顶管工艺有关, 该工艺属于敞开式顶管, 地表沉降难以控制, 同时该工艺采用水平定向钻控制顶管方向, 精度较差。

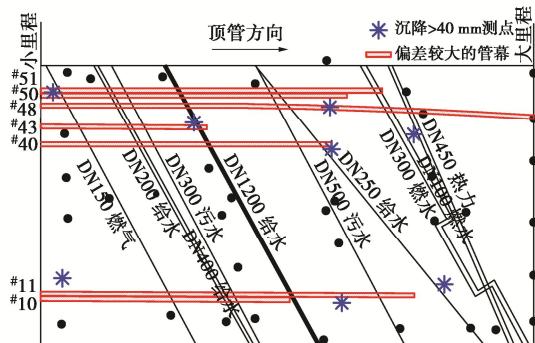


图 16 管幕施工期间地表沉降测点布置

Fig. 16 Monitoring points during pipe jacking

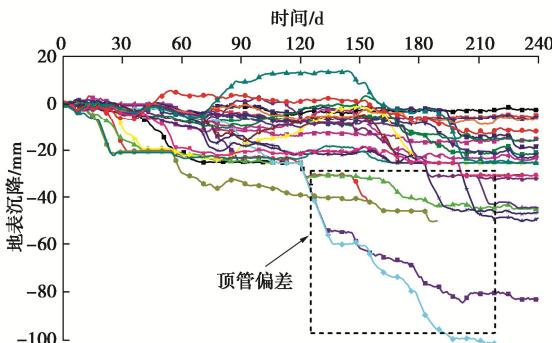


图 17 管幕施工期间地表沉降-时间曲线图

Fig. 17 Settlement-time curves of ground during pipe jacking

由于顶管期间地表沉降测点偏少、部分测点沉降值超过预警值、部分测点被破坏, 为进一步精确分析管幕完成后各施工阶段对地表沉降的影响, 加大监测范围和密度后重新布置了测点, 见图 18。

取暗挖段中间断面作为典型进行管幕完成后各阶段施工地表沉降分析, 断面各测点沉降-时间曲线和各

施工阶段地表沉降槽如图 19, 20 所示。

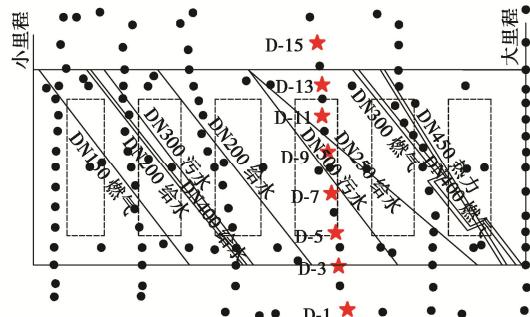


图 18 管幕完成后地表沉降测点布置

Fig. 18 Layout of monitoring points after pipe jacking

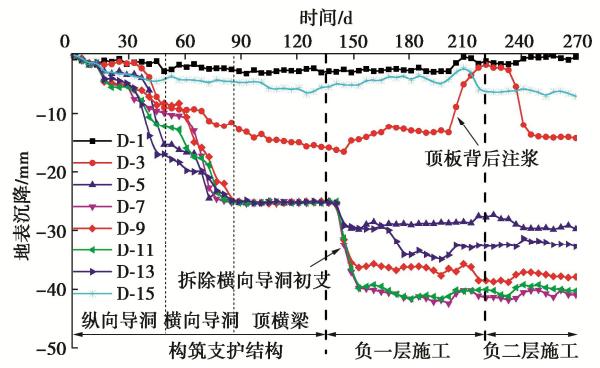


图 19 管幕完成后各阶段施工地表沉降-时间曲线图

Fig. 19 Settlement-time curves of steps after pipe jacking

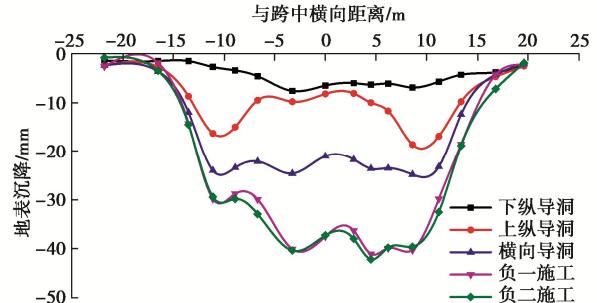


图 20 管幕完成后各阶段施工地表沉降槽

Fig. 20 Curves of transverse settlement of ground after pipe jacking

管幕完成后施工过程车站投影范围沉降平均值约 35 mm, 加上管幕施工期间地表沉降平均值 35 mm, 则累计沉降平均值约 70 mm, 与传统暗挖法常见上百毫米的地表沉降<sup>[11]</sup>相比, 新技术首次应用沉降控制便取得较为理想的效果, 而传统暗挖法基本无法应用于这种大跨超浅埋平顶直墙结构。

地表沉降实测结果显示管幕、导洞、结构 3 个施工阶段所占比例分别为 50%, 31.4%, 18.6%, 各阶段沉降槽形式、所占比例与数值分析基本相当, 但是实测值较数值分析结果偏大。管幕施工沉降偏大与地质条件及顶管工艺选择有关, 导洞和结构施工沉降偏大分析主要原因和导洞初支、顶横梁与管幕间的空隙未及时回填有关。由于混凝土自重及硬化收缩作用, 上层

导洞初支、顶横梁与管幕间会形成空隙，导洞初支和顶横梁背后注浆应及时进行以填充该空隙。由于注浆回填不利于施工组织，这一工序往往比较滞后，图20沉降-时间曲线局部回弹表明背后注浆是在拆除横导洞初支、顶板完成后进行的，虽然沉降出现短暂回弹，却无法改变最终沉降值。可见，加强顶管质量控制，及时注浆回填导洞初支、顶横梁与管幕间的空隙，可以更有效的控制新工法引起的地表沉降。

## 4 结语

为解决传统暗挖工法存在诸多局限和不足的问题，本文提出了在地层中提前构筑大刚度支护体系后再进行大开挖作业的新思路。大刚度支护体系采用顶管、小导洞等技术构筑，对地层扰动小，施工过程安全可靠，支护体系构筑后即可进行大开挖作业。新技术具有工艺简单、施工效率高、风险低、工程投资小、结构覆土埋深浅、对周边环境影响小的特点，可适用于各种地层和环境，值得推广应用。

数值分析和工程应用验证了新技术的有效性，采用密闭型顶管机施工管幕，并及时填充导洞初支、顶横梁与管幕间的空隙，可以进一步减少地表沉降。

## 参考文献：

- [1] 龚胜. 中洞法施工技术[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(增刊1): 1772-1775. (GONG Sheng. Middle hole construction method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(S1): 1772-1775. (in Chinese))
- [2] 惠丽萍, 崔志杰. PBA 工法——一种新的大型地下空间暗挖施工方法[C]// 中国土木工程学会快速轨道交通委员会学术交流会地下铁道专业委员会学术交流会, 北京, 2001. (HUI Liping, CUI Zhijie. PBA-a new subsurface excavation construction for large underground space[C]// Academic Exchange Meeting of Fast Rail Transit Committee China Civil Engineering Society, Beijing, 2001. (in Chinese))
- [3] 夏才初, 阙程柯, 刘胜. 顶进箱涵全断面置换管幕工法中钢管幕内力研究及实例分析[J]. 岩土力学, 2011, **32**(12): 3555-3560. (XIA Caichu, QUE Chengke, LIU Sheng. Study of internal forces and case study of pipe-roof for box culvert jacking and replacement full face pipe-roof method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(12): 3555-3560. (in Chinese))
- [4] 谭忠盛, 马栋, 孙晓静, 等. 不停航机场跑道下大断面隧道施工技术[J]. 土木工程学报, 2015, **48**(增刊1): 378-382. (TAN Zhongsheng, MA Dong, SUN Xiaojing, et al. Construction technology of large span tunnel under the non-stop flight runway[J]. China Civil Engineering Journal, 2015, **48**(S1): 378-382. (in Chinese))
- [5] 姚大钧, 吴志宏, 张郁慧. 软弱黏土中管幕工法之设计与分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, **23**(增刊2): 4999-5005. (YAO Dajun, WU Zihong, ZHANG Yuhui. Design and analysis of pipe roofing method in soft clay[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, **23**(增 S2): 4999-5005. (in Chinese))
- [6] 余晶, 程勇, 贾瑞华. 港珠澳大桥珠海连接线拱北隧道方案论证[J]. 现代隧道技术, 2012, **49**(1): 119-125, 131. (YU Jing, CHENG Yong, JIA Ruihua. Option demonstration for the Gongbei tunnel at the zhuhai link of the hong kong-zhuhai-macau bridge[J]. Modern Tunnelling Technology, 2012, **49**(1): 119-125, 131. (in Chinese))
- [7] 黎永索, 阳军生, 张可能, 等. 弧形密排大直径管群顶管地表沉降分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, **44**(11): 4687-4693. (LI Yongsuo, YANG Junsheng, ZHANG Keneng, et al. Surface subsidence caused by construction of large diameter curved jacking-pipes in pipe-roof pre-construction method[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2013, **44**(11): 4687-4693. (in Chinese))
- [8] 关永平, 贾鹏蛟, 赵文, 等. 基于 ABAQUS 的 STS 管幕结构受力性能数值分析[J]. 建筑结构, 2016, **46**(增刊2): 569-573. (GUAN Yongping, JIA Pengjiao, ZHAO Wen, et al. Numerical analysis of mechanical behavior of steel tube slab structure based on ABAQUS[J]. Building Structure, 2016, **46**(S2): 569-573. (in Chinese))
- [9] 冯建霖. 下穿机场跑道大断面隧道施工对策及地层变形规律研究[J]. 隧道建设, 2015, **35**(5): 473-477. (FENG Jianlin. Study on construction countermeasures for and ground deformation rule of construction of large cross-section tunnel crossing underneath existing airport runway[J]. Tunnel Construction, 2015, **35**(5): 473-477. (in Chinese))
- [10] 山村学, 高橋幸久, 近藤達也. 車両基地直下の長距離パイプルーフの施工[J]. トンネル工学報告集, 2006, **16**: 499-506. (HIGERU Fujimoto, YUICHI Fujita, SHINJO Sato. Under a vehicle base, we used a pipe roof method and constructed a road tunnel[J]. Collection of Tunnel Engineering Reports, 2006, **16**: 499-506. (in Japanese))
- [11] 罗富荣, 汪玉华, 郝志宏. 地铁车站洞桩法设计与施工关键技术[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2015. (LUO Furong, WANG Yuhua, HAO Zihong. Key Technology of Design And Construction of Subway Station Hole Pile Method[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2015. (in Chinese))