

# 洞柱法施工的三柱四跨地铁站导洞施工 顺序对地面沉降的影响

胡赛鸿

(长沙市城市建设投资开发集团有限公司, 410015, 长沙)

**摘要** [目的] 洞柱法车站施工时地面沉降受导洞施工顺序影响较大, 为了有效控制地面沉降, 需要研究导洞施工顺序的影响规律。[方法] 以田村站为工程背景, 建立了三柱四跨洞柱法车站导洞施工三维模型, 得出了合理的导洞开挖顺序。基于此, 为了缩短工期提出了导洞错距同步开挖的施工方法, 并结合现场实测数据研究了该施工方法对地面沉降的控制效果。[结果及结论] 先开挖下层导洞引起的地面沉降更小; 当导洞相距较近时, 同步开挖会产生群洞效应, 实际施工中为了有效控制地面沉降, 应采用单独开挖或者错距开挖的方式; 导洞错距同步开挖施工方法对地面沉降控制效果较好, 且显著缩短了工期。

**关键词** 地铁车站; 洞柱法; 导洞施工顺序; 地面沉降; 数值模拟

**中图分类号** U455.41; U231.4; TU433

**DOI**: 10.16037/j.1007-869x.2024.06.030

## Study on influence of construction sequence of Pile-Beam-Arch station pilot tunnels on surface settlement

HU Saihong

(Changsha Urban Construction Investment and Development Group Co., Ltd., 410015, Changsha, China)

**Abstract** [Objective] During construction of PBA (pile-beam-arch) method stations, land subsidence is greatly affected by the guiding hole excavation sequence. In order to effectively control land subsidence, it is necessary to study the influence law of the guiding hole construction sequence. [Method] Based on the engineering background of Tiancun Station, a three-dimensional guiding hole construction model for the tunnel of 3-pillar 4-span PBA method station is established, and a reasonable guiding hole excavation sequence is obtained. Based on the above result, in order to shorten the construction period, a staggered synchronous excavation method for the guiding hole construction is proposed, and its effect on land subsidence control is studied based on the on-site measured data. [Result & Conclusion] The land subsidence is smaller when the lower layer guiding hole is excavated first. When the guiding holes are close to each other, simultaneous excavation

will produce group hole effect. In order to effectively control land subsidence in actual construction, separate excavation or staggered excavation should be used. The staggered synchronous excavation method for guiding hole construction has a good effect on land subsidence control, and significantly shortens the construction period. The above method can provide a reference for the similar large-span tunnel station construction.

**Key words** metro station; PBA method; guiding hole construction sequence; land subsidence; numerical simulation

洞柱法能有效控制车站施工对地面沉降和既有建筑结构变形的影响, 被普遍应用于北京地铁车站的修建中<sup>[1]</sup>。目前, 我国对地铁站洞柱法施工的研究主要集中在地面沉降控制、导洞开挖顺序优化及边桩施工力学转换等方面, 并取得了丰富的成果<sup>[2]</sup>。

文献[3]研究认为, 北京地铁工程采用洞柱法施工能很好地控制地面沉降和既有隧道结构变形。文献[4]的研究表明, 先下后上、先边后中的导洞开挖顺序最合理, 导洞开挖过程引起的地面沉降在整个施工过程中所占比例最大。文献[5]研究了洞柱法结合大断面盾构隧道修建地铁车站的施工过程, 发现导洞施工阶段对地面沉降影响最大, 是控制地面沉降的关键性阶段, 并结合经验公式、国家规范及统计资料, 提出了各阶段的地面沉降控制标准。

为了研究导洞施工顺序对地面沉降的影响, 本文以北京地铁6号线田村站(以下简称“田村站”)为工程背景, 建立洞柱法施工的三柱四跨洞柱法车站导洞施工三维模型, 研究合理的导洞开挖顺序, 并结合工期因素提出导洞错距同步开挖法, 结合现场实测数据分析导洞错距同步开挖法对地面沉降的控制效果, 以期为类似的大跨度洞柱法车站施工提供参考。

## 1 工程概况及数值模型的建立

### 1.1 田村站工程概况

田村站位于田村路和玉泉路、旱河路交叉口,

沿田村路方向跨路口东西向“一”字型布置。田村站为地下车站,总长度为288 m,跨度约为40 m。该站西端的三柱四跨部分,结构长度为60 m,采用洞柱法全暗挖施工,覆土厚度为11.9 m,底板埋深为29.0 m。车站主体结构施工设置了5个临时施工竖井和4个横通道。

## 1.2 数值模型

### 1.2.1 基本假定

本研究采用有限元软件参照实际工程情况,建立田村站三维数值模型(以下简称“田村站模型”),通过模拟大断面车站导洞的不同开挖顺序及导洞开挖错距,研究洞柱法车站导洞施工顺序对地面沉降的影响。

数值模型的模拟计算作如下假定:①假定地层材料为各向同性,且为均质的;②假定车站为城市浅埋车站,故只考虑自重应力,且本构模型采用莫尔-库仑本构模型;③因地下水水位较深,故假定无地下水的影响。

### 1.2.2 模型与边界条件

田村站模型如图1所示。该模型尺寸为120 m×60 m×60 m,共有443 821个单元,224 833个节点。

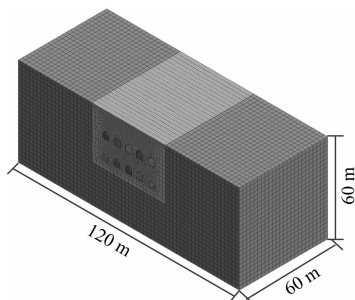


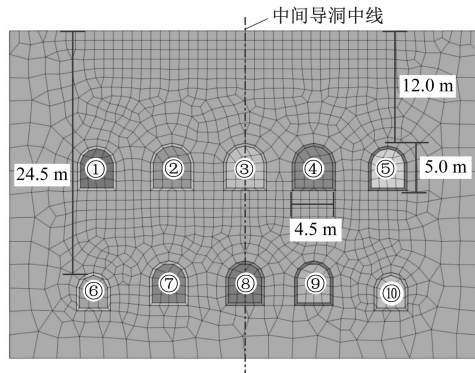
图1 田村站模型

Fig. 1 Tiancun Station model

田村站模型顶部为自由面,底部为固定约束,4个侧面为法向约束,导洞宽4.5 m,高约5.0 m,5个导洞的总跨度约为40.0 m,上部导洞埋深约为12.0 m,下部导洞埋深约为24.5 m。田村站模型的导洞细部结构如图2所示。其中:地层和导洞衬砌均采用三维实体单元模拟;导洞所处地层均为卵石层,采用Mohr-Coulumb本构模型;衬砌为C30混凝土,采用弹性本构模型。

### 1.2.3 模型参数

根据地质勘探资料,模拟计算所用的材料主要力学参数如表1所示。在模拟过程中通过“杀死”单元来模拟开挖,并通过改变单元参数来模拟支护。



注:①—⑩为导洞编号。

图2 田村站模型的导洞细部图

Fig. 2 Guiding hole details of Tiancun Station model

表1 材料主要力学参数

Tab. 1 Main mechanical parameters of the material

| 材料  | 弹性模量/<br>MPa | 重度/<br>(kN/m <sup>3</sup> ) | 内摩擦角/<br>(°) | 黏聚力/<br>kPa | 泊松比  |
|-----|--------------|-----------------------------|--------------|-------------|------|
| 卵石层 | 1 400        | 16.7                        | 32           | 660         | 0.37 |
| 衬砌  | 32 500       | 25.0                        |              |             | 0.21 |

## 1.3 导洞开挖顺序工况的设置

为了确定合理的导洞开挖顺序,本文设置了6种导洞开挖顺序工况,见表2。通过工况1、工况2的模拟计算结果,可分析上下层导洞开挖先后顺序对地面沉降的影响,由工况2—工况6的模拟结果对比,可以得出地面沉降最小的导洞开挖顺序工况,从而为施工提供参考。

## 2 导洞施工顺序对地面沉降影响分析

为了直观体现各个导洞开挖过程中地面沉降变化规律,按不同工况模拟各导洞开挖时的地面沉降变化情况,并以地面沉降计算点距中间导洞中线的水平距离 $x$ 为横坐标,绘制各工况不同施工阶段的地面沉降曲线,进而总结地面沉降变化规律。

### 2.1 工况1的地面沉降变化规律

工况1不同施工阶段的地面沉降曲线如图3所示。由图1可以看出:导洞开挖对其正上方的地面沉降影响最大,且距离地面较近的上层导洞开挖对地面沉降的影响更为明显;随着导洞开挖的进行,地面沉降逐渐增大;导洞开挖完成后地面最大沉降约为13.2 mm。

为了研究不同导洞开挖对地面沉降影响程度的大小,绘制单一导洞开挖引起的地面沉降增量图如图4所示。由图4可以看出:与下层导洞开挖相比,上层导洞开挖引起的地面沉降增量更大。此

表 2 导洞施工顺序工况

| 导洞开挖顺序工况 | 导洞开挖顺序                      | 顺序设置的方式                  |
|----------|-----------------------------|--------------------------|
| 工况 1     | ①→⑤→②→④→③→⑥→⑩→⑦→⑨→⑧         | 先上层后下层,先两边后中间            |
| 工况 2     | ⑥→⑩→⑦→⑨→⑧→①→⑤→②→④→③         | 先下层后上层,先两边后中间            |
| 工况 3     | (⑥、⑩)→⑦→⑨→⑧→(①、⑤)→②→④→③     | 先下层后上层,两侧导洞同时开挖,中间导洞逐个开挖 |
| 工况 4     | (⑥、⑩)→(⑦→⑨)→⑧→(①、⑤)→(②→④)→③ | 先下层后上层,两侧导洞同时开挖          |
| 工况 5     | (⑥、⑨)→(⑦、⑩)→⑧→(①、④)→(②、⑤)→③ | 先下层后上层,两侧导洞交叉同步开挖        |
| 工况 6     | (⑥、⑦、⑧、⑨、⑩)→(①、②、③、④、⑤)     | 先下层后上层,单层导洞同时开挖          |

注:①—⑩为导洞编号;(①、⑤)表示导洞①和导洞⑤同步开挖;余类同。

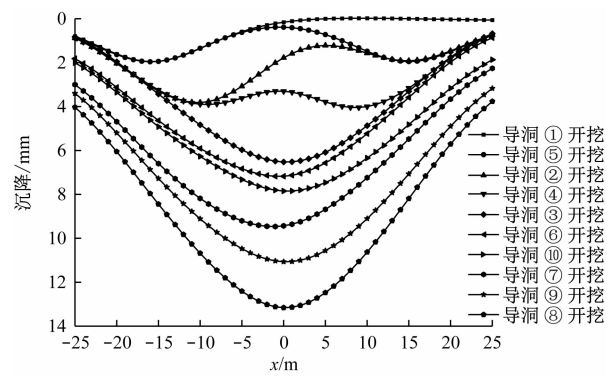


图 3 工况 1 不同施工阶段的地面沉降曲线

Fig. 3 Land subsidence curves in different construction stages under Case 1

外,无论上下层导洞,均可看出两侧导洞开挖对地面沉降的影响具有对称性:最外侧导洞开挖引起的地面沉降增量最小,内侧导洞次之,中间导洞开挖引起的地面沉降增量最大。这说明越靠近导洞中线,导洞开挖对地面沉降影响越明显。经分析,外侧导洞开挖时彼此距离较远,相互影响较小,且边跨导洞开挖面较小,而中间导洞距离两侧导洞近,故其开挖会产生群洞效应,使地面沉降明显增大。

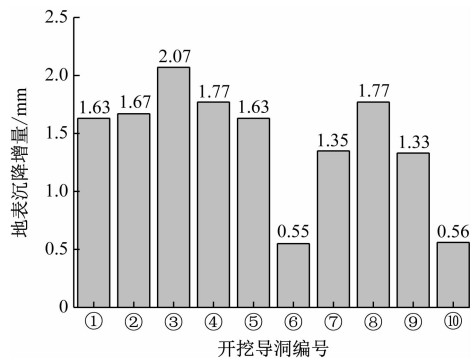


图 4 单一导洞开挖引起的地面沉降增量

Fig. 4 Land subsidence increment caused by single guiding hole excavation

2.2 上下层导洞开挖顺序对沉降的影响

工况 2 不同施工阶段的地面沉降曲线如图 5 所示。由图 2 可以看出:地面沉降随着导洞开挖的进行逐渐增大,且上层导洞开挖对地面沉降的影响大于下层导洞的开挖。导洞全部开挖完成后地面沉降最大值约为 12 mm。

对比图 3 和图 5 可知,工况 2 沉降值比工况 1 沉降值小,说明先开挖下层导洞、再开挖上层导洞的施工顺序更合理,故实际施工中应先开挖下层导洞。

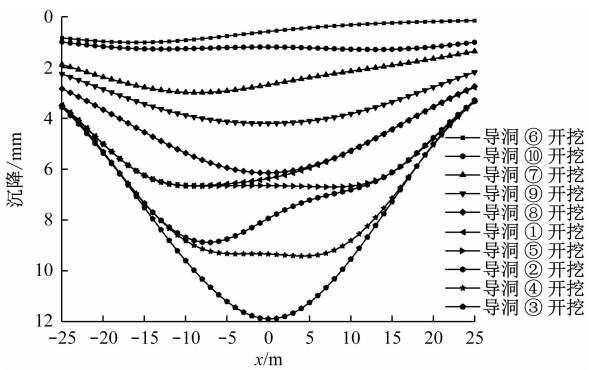


图 5 工况 2 不同阶段地面沉降规律

Fig. 5 Land subsidence curves in different construction stages under Case 2

2.3 不同导洞组合开挖方式对沉降的影响

工况 3—工况 6 不同施工阶段的地面沉降曲线如图 6 所示。由图 6 可见,无论采取哪种工况,随着导洞开挖的进行,地面沉降均逐渐增大,且导洞开挖对其正上方地面沉降的影响最大。

由图 6 a) 可见,工况 3 的导洞开挖完成后地面最终沉降  $d_m$  为 12 mm,相较于工况 2 的  $d_m$  基本没有增长,说明最外侧两个导洞同时开挖和单独开挖对地面沉降基本没有影响。由此可知,为了加快施工进度,导洞距离较远的最外侧两个导洞可以同时开挖。

由图 6 b) 可见, 工况 4 的  $d_m$  为 13.8 mm, 比工况 3 的  $d_m$  增大了 15%, 说明导洞②+④, 以及⑦+⑨同时开挖会引起地面沉降增大。这是由于距离较近的导洞同时开挖, 会相互影响所致。在实际施工中, 为了有效控制地面沉降, 此类距离较近导洞应分开开挖或者错距开挖。

由图 6 c) 可见, 工况 5 的  $d_m$  为 13.1 mm, 相较于工况 3 的  $d_m$  增大了 9%, 相较于工况 4 的  $d_m$  减小了 5%。这是由于同时开挖的导洞(⑥+⑨), 以及

⑦+⑩) 均相距较远, 故引起的地面沉降也会减小。此时与工况 3 相比, 沉降仍有所增大。由此可知, 实际施工中应根据地面沉降控制要求合理设置导洞开挖工序。

由图 6 d) 可见, 工况 6 的  $d_m$  为 18.7 mm, 相较于工况 3 的  $d_m$  增大了 56%。经分析, 单层导洞同时开挖会产生明显的群洞效应, 导致地面沉降显著增大, 故在实际施工中应尽量避免较多导洞同时开挖。

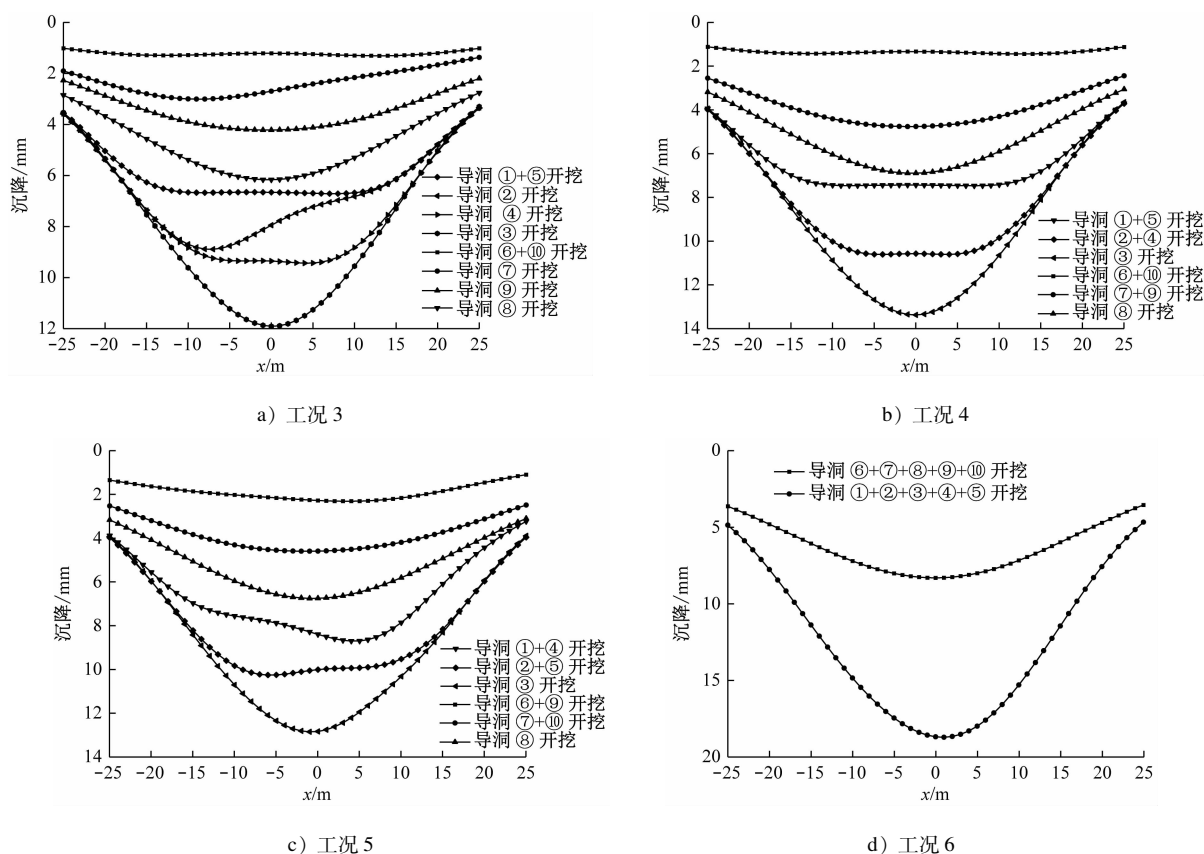


图 6 不同导洞组合开挖方式各阶段地面沉降规律

Fig. 6 Land subsidence curves in different construction stages with different guiding hole combination excavation methods

模拟可得各开挖工况下地面中轴线处的沉降变化曲线如图 7 所示。由模拟结果可知: 随着施工的进行, 地面中轴线处沉降逐渐增大; 工况 1—工况 3 的沉降变化规律基本一致; 工况 4—工况 6 下, 施工步越短, 对应的沉降就越大。

### 3 导洞错距同步开挖法及其效果

由模拟计算结果可知, 与单导洞逐步开挖相比, 仅最外侧两侧同时开挖(工况 3)不会增大地面沉降, 但此开挖方式的施工工期相对较长。因此, 本文在工况 3 的基础上提出了导洞错距同步开挖

法, 即外侧导洞同步开挖、其余导洞错距开挖的施工方法。田村站的导洞错距同步开挖法施工顺序如图 8 所示。各导洞间的开挖错距取 10 m。

为了研究新提出的开挖方式导洞施工完成后的地面沉降值, 重新建立了三维数值模型对其进行模拟, 图 9 为导洞错距开挖过程中地面沉降变化曲线。经模拟计算,  $d_m$  为 11.5 mm, 基本与工况 2 的  $d_m$  一致。由此可见, 新提出的开挖方式不仅能有效控制地面沉降, 还能缩短导洞施工工期, 可为类似工程提供参考。



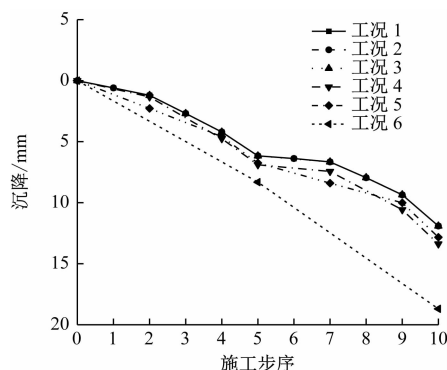
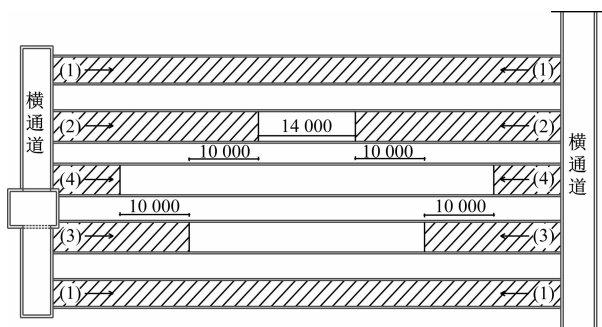


图7 地面中轴线处沉降变化曲线

Fig. 7 Land subsidence curves on the ground axis line



注:(1)一(5)代表施工顺序,阴影表示已开挖部分;单位为 mm。

图8 典型节点的导洞错距同步开挖法施工顺序示意图

Fig. 8 Schematic drawing of the construction sequence of guiding hole staggered synchronous excavation at typical nodes

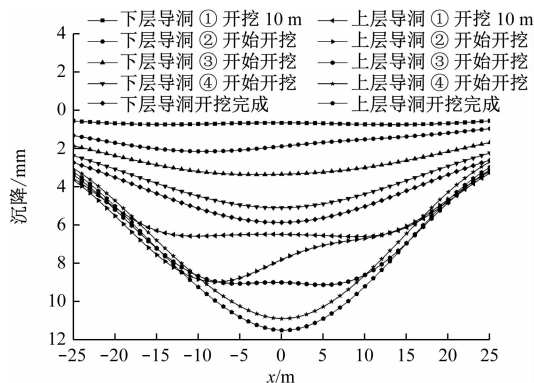


图9 导洞错距开挖地面沉降规律

Fig. 9 Land subsidence curves in guiding hole staggered excavation

#### 4 工程实测结果验证

田村站最终采用新提出的开挖方式进行了导洞施工,并在施工过程中对地面沉降进行了实际监测。根据地面沉降实测值拟合地面沉降曲线,并与模拟值进行对比,结果如图10所示。由图10可见:

地面沉降模拟值最大值为11.5 mm,实测值最大值约为12.0 mm,二者误差约为5%,验证了本研究模拟结果的准确性,说明通过有限元数值模型来模拟计算导洞施工顺序对地面沉降的影响,进而作为导洞施工顺序优化方案的依据是可行的。

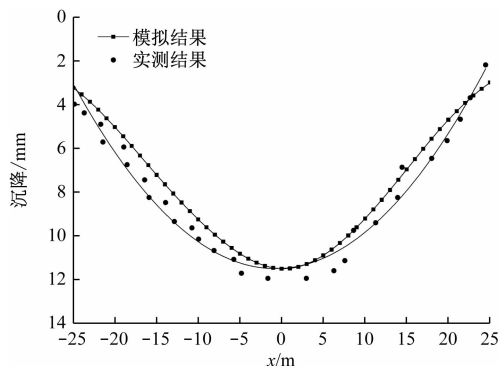


图10 田村站采用导洞错距同步开挖顺序时地面沉降实测结果与模拟结果对比

Fig. 10 Comparison of measured and simulated results when using the construction sequence of guiding hole staggered synchronous excavation in Tiancun Station

#### 5 结语

本文以田村站为工程背景,建立了三柱四跨洞柱法车站导洞施工三维模型,研究了导洞施工顺序对地面沉降的影响,提出了导洞错距同步开挖的施工方法,并结合现场实测数据研究了其对地面沉降的控制效果,主要结论如下:

1) 导洞开挖时对其正上方地面沉降影响最大,上层导洞开挖对地面沉降的影响较为明显,且越靠近导洞中线,导洞开挖对地面沉降影响越明显。

2) 先开挖下层导洞再开挖上层导洞的施工顺序比先开挖上层导洞合理,实际施工中应先开挖下层导洞。

3) 导洞相距较远时,同步开挖不会加剧地面沉降,为了缩短工期可以同步开挖。当导洞相距较近时,同步开挖会产生群洞效应,实际施工中为了有效控制地面沉降,应采用单独开挖或者错距开挖的方式。

4) 综合考虑地面沉降控制效果和缩短工期,提出了外侧导洞同步开挖、其余导洞错距开挖的施工方法,并采用数值模拟和现场监测对比分析的方法,验证了本施工方法的可行性,为类似的大跨度洞柱法车站施工提供参考。

(下转第171页)

- 型的岩土工程非线性时间序列预测[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2021, 49(8): 1107.
- QIAN Jiangu, WU Anhai, JI Jun, et al. Nonlinear time series prediction of geotechnical engineering based on LSTM-ARMA model optimized by wavelet[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2021, 49(8): 1107.
- [9] 刘青豪, 张永红, 邓敏, 等. 大范围地表沉降时序深度学习预测法[J]. 测绘学报, 2021, 50(3): 396.
- LIU Qinghao, ZHANG Yonghong, DENG Min, et al. Time series deep learning prediction method for large-scale surface subsidence[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2021, 50(3): 396.
- [10] 杨俊超. 基于大数据分析 with 挖掘的铁路沉降灾害预警模型研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2021.
- YANG Junchao. Research on early warning model of railway subsidence disaster based on big data analysis and mining[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2021.
- [11] 洪宇超, 钱建固, 叶源新, 等. 基于时空关联特征的 CNN-LSTM 模型在基坑工程变形预测中的应用[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(增刊2): 108.
- HONG Yuchao, QIAN Jiangu, YE Yuanxin, et al. Application of CNN-LSTM model based on spatio-temporal correlation characteristics in deformation prediction of foundation pit engineering[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(S2): 108.
- 收稿日期:2022-01-21 修回日期:2022-02-24 出版日期:2024-06-10  
Received:2022-01-21 Revised:2022-02-24 Published:2024-06-10  
• 第一作者:黄茂庭, 硕士研究生, Huangmaoting916@163.com  
通信作者:徐金明, 教授, xjming@163.com  
• ©《城市轨道交通研究》杂志社, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议  
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(上接第 165 页)

## 参考文献

- [1] 黄宏伟. 隧道及地下工程建设中的风险管理研究进展[J]. 地下空间与工程学报, 2006, 2(1): 13.
- HUANG Hongwei. State-of-the-art of the research on risk management in construction of tunnel and underground works[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2006, 2(1): 13.
- [2] LI B, WANG Z Z. Numerical study on the response of ground movements to construction activities of a metro station using the pile-beam-arch method[J]. Tunnelling and Underground Space Technology Incorporating Trenchless Technology Research, 2019, 88: 209.
- [3] 张成平, 张顶立, 吴介普, 等. 暗挖地铁车站下穿既有地铁隧道施工控制[J]. 中国铁道科学, 2009, 30(1): 69.
- ZHANG Chengping, ZHANG Dingli, WU Jiepu, et al. Construction control of a newly-built subway station undercrossing the existing subway tunnel[J]. China Railway Science, 2009, 30(1): 69.
- [4] 白明洲, 许兆义, 时静, 等. 复杂地质条件下浅埋暗挖地铁车站施工期地面沉降量 FLAC<sup>3D</sup> 分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增刊2): 4254.
- BAI Mingzhou, XU Zhaoyi, SHI Jing, et al. Analysis of ground settlement of a subway station undercut with shallow overburden during construction with FLAC<sup>3D</sup> under complex geological conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(S2): 4254.
- [5] LIU J, WANG F, HE S, et al. Enlarging a large-diameter shield tunnel using the Pile-Beam-Arch method to create a metro station[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2015, 49: 130.
- 收稿日期:2022-06-14 修回日期:2022-08-14 出版日期:2024-06-10  
Received:2022-06-14 Revised:2022-08-14 Published:2024-06-10  
• 作者:胡赛鸿, 高级工程师, 2483877200@qq.com  
• ©《城市轨道交通研究》杂志社, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议  
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

## 《城市轨道交通研究》被 Research4Life-HINARI 数据库收录

2024 年 4 月 20 日,《城市轨道交通研究》被国际知名数据库 Research4Life-HINARI 数据库正式收录。Research4Life 是世界卫生组织、粮农组织、联合国环境规划署、知识产权组织、国际劳工组织、康奈尔大学和耶鲁大学与多达 155 家科学出版社之间合作伙伴关系的总称,其宗旨是促进发展中国家科学研究的发展。

Research4Life 包括健康研究(HINARI)、农业研究(AGORA)、环境研究(OARE)、发展与创新研究(ARDI)和全球正义研究(GOALI)五个项目计划。自 2002 年以来,Research4Life 为超过 125 个中低收入国家的 11 500 多家机构的研究人员,免费或低成本提供了 203 000 多种领先期刊和书籍,包括卫生、农业、环境、应用科学和法律信息等领域。

(供稿:《城市轨道交通研究》编辑部)