

# 软土地区河道开挖对下方地铁隧道变形的影响及其控制措施

叶如<sup>1</sup> 曾婕<sup>2</sup> 成怡冲<sup>2</sup> 姚煌<sup>2</sup> 安然<sup>2</sup> 龚迪快<sup>2</sup>

(1. 宁波市轨道交通集团有限公司建设分公司, 315101, 宁波; 2. 浙江华展研究设计院股份有限公司, 315012, 宁波)

**摘要** [目的] 地铁盾构隧道因上方河道开挖卸荷产生隆起变形, 可能会影响地铁隧道的正常运行。为此, 应就软土地区河道开挖工程对下方地铁隧道的变形影响进行研究, 并制定地铁隧道变形控制措施。[方法] 介绍了案例工程的概况, 采用有限元方法对其实测数据进行分析, 验证了土体本构模型及参数的合理性。基于具有典型软土特征的宁波地区地层剖面 and 土层参数, 建立了土体简化模型, 依次分析了河道开挖宽度变化对下方地铁隧道变形的影响、河道开挖深度变化对下方地铁隧道变形的影响、软土层埋深对地铁隧道变形的影响。介绍了门架式土体加固措施及门架式梁板加固措施两种变形控制措施, 将考虑了控制变形措施的计算模型与基准模型的有限元计算结果进行了比较分析。[结果及结论] 在土体加固和河道开挖阶段, 下方地铁隧道变形分别表现为沉降和隆起; 河道开挖断面面积相同时, 减小河道的开挖深度、增加河道开挖宽度, 有利于减少下方地铁隧道变形; 地铁隧道竖向位移主要由其下方土体回弹变形产生; 门架式梁板加固措施对于地铁隧道隆起变形的控制效果明显。

**关键词** 地铁盾构隧道; 软土地区; 河道开挖; 隧道变形; 数值模拟; 变形控制

**中图分类号** U455.43

**DOI**: 10.16037/j.1007-869x.2024.04.029

## Influence of Soft Soil Area River Excavation on Underlying Metro Tunnel Deformation and Control Measures

YE Ru<sup>1</sup>, ZENG Jie<sup>2</sup>, CHENG Yichong<sup>2</sup>, YAO Huang<sup>2</sup>, AN Ran<sup>2</sup>, GONG Dikuai<sup>2</sup>

(1. Construction Branch, Ningbo Rail Transit Group Co., Ltd., 315101, Ningbo, China; 2. Zhejiang Huazhan Research and Design Institute Co., Ltd., 315012, Ningbo, China)

**Abstract** [Objective] The unloading-induced upheaval deformation resulting from river excavation above metro shield tunnels may affect metro tunnel normal operation. Therefore, it is necessary to study the deformation effects of soft soil area river excavation on underlying metro tunnels and formulate control measures for metro tunnel deformation. [Method] The general overview of a case project is presented, and finite ele-

ment method is conducted on its field-measured data analysis to validate the reasonability of the soil constitutive model and parameters. Based on the characteristic soft soil profile and soil parameters of Ningbo region stratum, a simplified soil mass model is established. The impact of changes in river excavation width, depth and the burial depth of soft soil layers on the deformation of underlying metro tunnels is analyzed sequentially. Two deformation control measures of gantry-type soil reinforcement and gantry-type beam-slab reinforcement, are introduced. A comparative analysis is performed between the finite element calculation results considering the control deformation measures and the baseline model. [Result & Conclusion] During soil reinforcement and river excavation stages, the deformation of underlying metro tunnel manifested as settlement and upheaval, respectively. When maintaining the same cross-sectional area for river excavation, reducing the river excavation depth and increasing the river excavation width are conducive to minimizing underlying metro tunnel deformation. Vertical displacement of the metro tunnel is primarily influenced by the rebound deformation of the soil below it. The gantry-type beam-slab reinforcement measure exhibits a noticeable control effect on metro tunnel upheaval deformation.

**Key words** metro shield tunnel; soft soil area; river excavation; tunnel deformation; numerical simulation; deformation control

我国东南沿海的城市广泛分布着深厚的软土沉积层。随着这些城市的地铁网络逐步建成, 在已建地铁隧道上方进行河道开挖或清淤的情况越来越多。当设计河底标高与地铁隧道顶标高接近时, 开挖作业会对地铁隧道产生较大的影响<sup>[1]</sup>。

关于在既有地铁隧道上方进行土体开挖卸载的研究主要包括理论分析、现场实测和数值模拟 3 个方面。文献[2-4]主要提出了地铁隧道变形的预测方法, 并研究了上方土体开挖对下方地铁隧道的影响规律, 而对于减少下方隧道变形控制措施的研究则借助了数值模拟方法。文献[5]将有限元计算结

果和实际工程的监测数据进行对比,验证了土体加固+门式梁板措施的效果;文献[6]以上海某地铁区间隧道上方河道开挖为工程背景,分析了地铁隧道的保护措施,并通过三维有限元模型分析了措施的有效性;文献[7]通过数值计算,研究了某河道开挖工程对下方复杂地铁隧道的变形影响,提出了在复杂地铁隧道环境下上方基坑开挖的保护措施。

目前对地铁隧道的数值模拟研究中,对隧道上方桩基施工、河道开挖施工全过程进行数值模拟分析的文献较少,且鲜有针对河道开挖对下方地铁隧道影响规律及变形控制措施的研究。本文结合宁波市某软土地区河道开挖案例,采用 MIDAS GTS 有限元软件,对地铁隧道上方桩基施工、河道开挖施工全过程进行数值模拟分析,并就河道开挖施工对下方地铁隧道的影响规律和变形控制措施进行研究。

## 1 案例工程概况及实测数据分析

### 1.1 工程概况

该河道开挖工程与下方的地铁区间隧道正交,地铁隧道范围内河底标高为 $-0.60\text{ m}$ 。地铁区间隧道顶部埋深约为 $16.373\text{ m}$ ,隧道顶至河底的距离为 $13.083\text{ m}$ 。地铁隧道采用盾构法施工,分为上行线和下行线。地铁上、下行线之间的净间距为 $5.8\text{ m}$ ,其隧道外径均为 $6.2\text{ m}$ ,内径均为 $5.5\text{ m}$ 。

为减小河道开挖对地铁隧道的影响,在河道开挖前对隧道一定范围内土体进行了加固,加固措施为:采用 $\phi 850\text{ mm}@600\text{ mm}$ 三轴搅拌桩,其水泥搅拌桩水泥掺量为 $20\%$ , $28\text{ d}$ 无侧限抗压强度不小于 $1.0\text{ MPa}$ 。加固的平面范围为 $688\text{ m}^2$ ,其中地面以下 $9.143\text{ m}$ 竖向范围内采用水泥搅拌桩满堂弱加固,其余区域采用水泥搅拌桩门式强加固。河道开挖区域下方地铁隧道保护加固设计的平、剖面图如图1所示。

### 1.2 实测数据分析

在地铁上、下行线上分别选取 $12$ 个测点,图2为这 $24$ 个测点的位置布置图,上行线各监测点的间距、下行线各监测点的间距均为 $6\text{ m}$ 。

河道开挖过程中,地铁上、下行隧道结构累计沉降曲线分别如图3和图4所示。由图3和图4可知:①在三轴搅拌桩施工阶段,由于加固范围内土体被改良为水泥土,其密度和质量增加,加上一定的施工荷载,下方地铁隧道受向下的压力作用,地铁隧道结构变形主要表现为沉降,其最大沉降量为 $1.7\text{ mm}$ 。②在加固土体养护阶段,随着桩架等施工荷

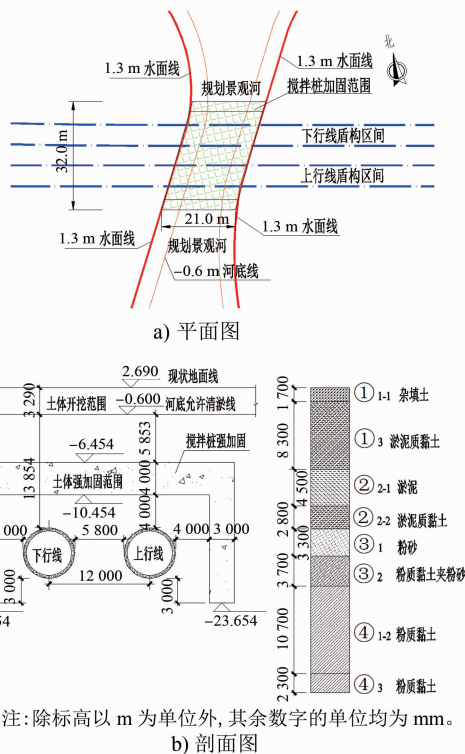


图1 河道开挖区域下方地铁隧道保护加固设计的平、剖面图  
Fig. 1 Plan and profile drawings of protection and reinforcement design of metro tunnel under river excavation area

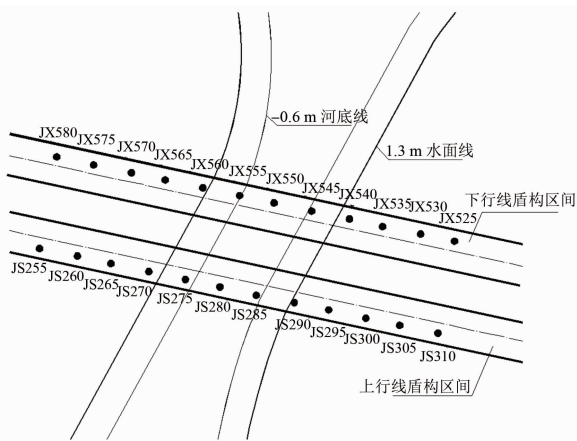


图2 隧道监测点平面布置图

Fig. 2 Planar layout diagram of tunnel monitoring points  
载的卸除及水泥土固化阶段的回缩,地铁隧道结构有轻微的隆起趋势,其最大隆起量为 $1.2\text{ mm}$ 。由此可知,土体加固及养护阶段结束后,地铁上行线隧道结构变形以沉降为主,地铁下行线隧道结构变形以隆起为主。③开挖非隧道范围河道时,地铁隧道结构的最大隆起量为 $1.1\text{ mm}$ ;开挖隧道范围河道时,地铁隧道结构的最大隆起量为 $1.6\text{ mm}$ ;地铁隧道结构的隆起变形主要发生在开挖隧道上方土体阶段。

1.3 全过程数值模拟

1.3.1 模型的建立

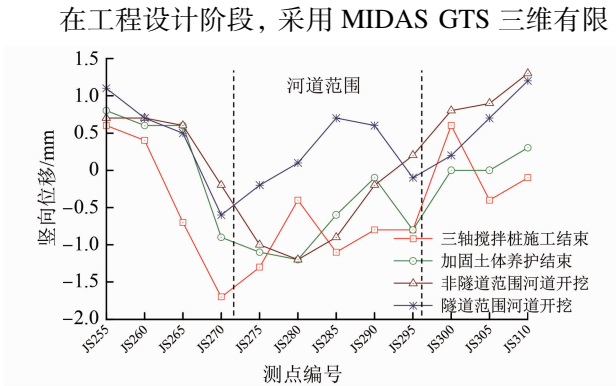


图 3 地铁上行线隧道结构累计竖向位移曲线

Fig. 3 Cumulative vertical displacement curves of metro upward line tunnel structure

表 1 河道开挖区域内各地层土体的主要参数

Tab.1 Main parameters of each stratum soil in the river excavation area						
地层	重度/(kN/m <sup>3</sup> )	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	切线刚度/MPa	割线刚度/MPa	卸载或加载刚度/MPa
① <sub>1-1</sub> 杂填土	16.7	12.7	8.5	2.0	3.0	6.0
① <sub>3</sub> 淤泥质黏土	17.8	10.1	8.8	3.4	5.0	10.1
② <sub>2-1</sub> 淤泥	16.5	10.1	8.8	2.4	3.6	7.3
② <sub>2-2</sub> 淤泥质黏土	16.4	10.4	9.1	2.0	3.0	6.0
③ <sub>1</sub> 粉砂	20.1	6.4	31.4	12.3	12.3	36.8
③ <sub>2</sub> 粉质黏土夹粉砂	18.4	21.1	16.5	4.1	4.1	24.6
④ <sub>1-2</sub> 粉质黏土	17.8	18.1	15.8	3.9	3.9	23.5
④ <sub>3</sub> 粉质黏土	17.9	18.0	15.0	4.2	4.2	25.2

地铁区间隧道结构材料采用线弹性模型模拟,弹性模量取 34.5 GPa,泊松比取 0.2,三轴搅拌桩施工荷载取 20 kPa。图 5 为所建的河道开挖区域及地铁隧道的三维有限元模型,模型尺寸为 100 m(长)×66 m(宽)×50 m(高)。

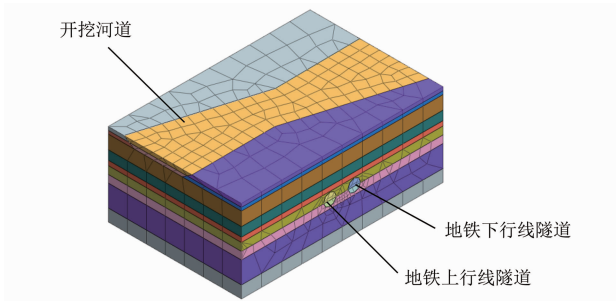


图 5 河道开挖区域及地铁隧道的三维有限元模型

Fig. 5 Three-dimensional finite element model of river excavation area and metro tunnel

1.3.2 模拟值与实测值的对比

图 6 为三轴搅拌桩施工工况和河道开挖工况两

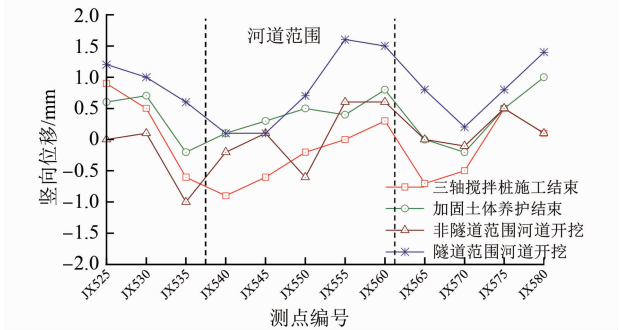
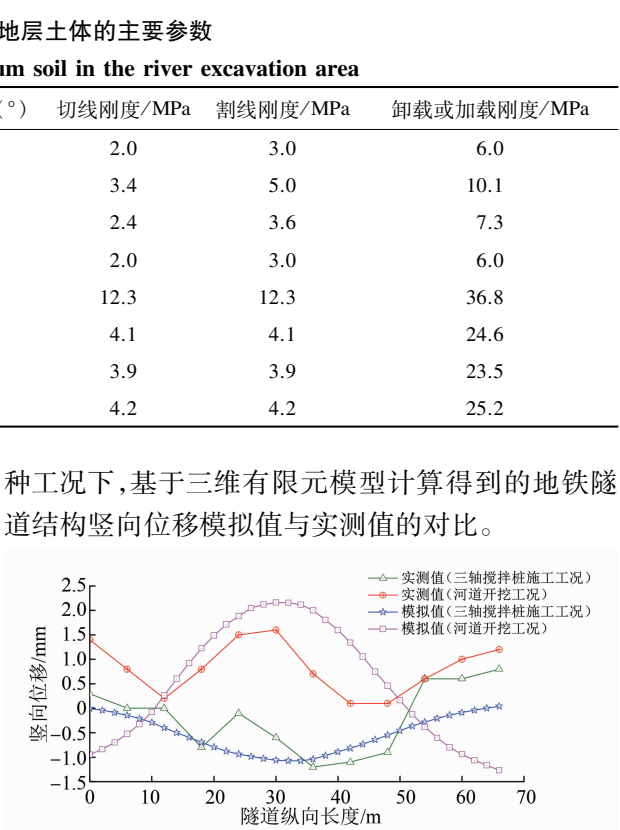


图 4 地铁下行线隧道结构累计竖向位移曲线

Fig. 4 Cumulative vertical displacement curves of metro downward line tunnel structure

种工况下,基于三维有限元模型计算得到的地铁隧道结构竖向位移模拟值与实测值的对比。



注:横轴等于 0 处对应图 2 的 JX580 监测点。

图 6 两种工况下地铁隧道竖向位移实测值与模拟值的对比

Fig. 6 Comparison of field-measured and simulated values of metro tunnel vertical displacement under two working conditions

由图 6 可知:①地铁隧道竖向位移模拟值与实测值在施工各阶段趋势一致,数值大小接近;②有限元分析中采用的硬化土体模型能够较好地反映河道开挖引起下方地铁隧道的竖向位移情况;③本文模

拟计算中所采用的参数取值合理,可在此基础上进一步研究河道开挖施工对下方地铁隧道竖向位移的影响规律及控制措施。

## 2 河道开挖对下方地铁隧道变形的影响规律

### 2.1 土体简化模型的建立

表 2 宁波地区土层主要参数

Tab. 2 Main parameters of soil layer in Ningbo region

地层	厚度/m	重度/(kN/m <sup>3</sup> )	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	切线刚度/MPa	割线刚度/MPa	卸载或加载刚度/MPa
②层淤泥质土	30	16.4	10.4	9.1	2	3	6
⑤层粉质黏土	20	19.5	25.0	14.5	6	6	36

图 7 为建立的三维有限元模型之一,模型尺寸为 150 m(长)×150 m(宽)×50 m(高)。

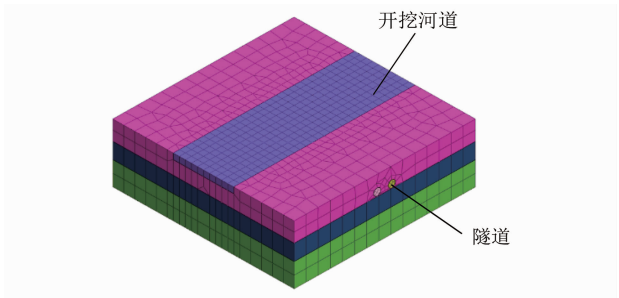


图 7 土体简化后的三维有限元模型

Fig. 7 Simplified three-dimensional finite element model of soil

### 2.2 建模方案

首先,为了研究河道的宽度和深度对下方地铁隧道变形的影响,建立了河道不同开挖宽度和开挖深度的 25 个三维有限元模型,建模方案如表 3 所示,模型中地铁隧道顶埋深均为 10.0 m。其次,研究土层因素对地铁隧道变形的影响,通过改变淤泥质土层的厚度,得到不同地层情况下河道开挖对下方地铁隧道变形的影响,此时选取的模型为模型 25,即:河道开挖宽度取 50 m,开挖深度取 5.0 m,地铁隧道顶埋深取 15.5 m。

表 3 建模方案

Tab. 3 Modeling scheme

河道开挖深度/m	河道开挖宽度/m				
	10	20	30	40	50
1.0	模型 1	模型 2	模型 3	模型 4	模型 5
2.0	模型 6	模型 7	模型 8	模型 9	模型 10
3.0	模型 11	模型 12	模型 13	模型 14	模型 15
4.0	模型 16	模型 17	模型 18	模型 19	模型 20
5.0	模型 21	模型 22	模型 23	模型 24	模型 25

为了有针对性地对河道开挖过程中下方地铁隧道变形进行分析,选取宁波地区典型的地层剖面和土层参数(见表 2),采用 MIDAS GTS 三维有限元软件建立模型,并对土层分布进行简化。土体采用硬化土模型,河道与地铁隧道呈正交布置,隧道管片参数取值同上文所述。

### 2.3 计算结果分析

#### 2.3.1 河道开挖宽度变化对下方地铁隧道的变形影响

在不同河道开挖深度  $h$  下,地铁隧道竖向位移与河道开挖宽度  $L$  的关系曲线如图 8 所示。由图 8 可知:①地铁隧道竖向位移均表现为隆起变形;②随着  $L$  的增加,地铁隧道竖向位移呈非线性增长,其增量逐渐变小;③ $h$  越大,地铁隧道竖向位移随  $L$  增大的速度越快;④当  $h = 1.0$  m、 $L = 50$  m 或  $h = 5.0$  m、 $L = 10$  m 时,河道开挖断面均为  $50\text{ m}^2$ ,两种工况下地铁隧道竖向位移分别为  $5.7\text{ mm}$  和  $9.2\text{ mm}$ 。由此可见,河道开挖断面面积相同时,减小  $h$ ,增加  $L$ ,有利于减少地铁隧道竖向位移。

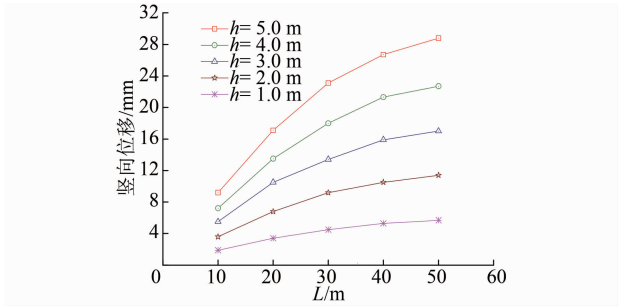


图 8 不同河道开挖深度下地铁隧道竖向位移与河道开挖宽度的关系曲线

Fig. 8 Relationship curves of metro tunnel vertical displacement and river excavation width under different river excavation depths

#### 2.3.2 河道开挖深度变化对下方地铁隧道变形的影响

不同  $L$  下地铁隧道竖向位移与  $h$  的关系曲线如图 9 所示。由图 9 可知:①随着  $h$  的增加,地铁隧道竖向位移呈线性增长;② $L$  越大,隧道竖向位移随  $L$  增大的速度越快。

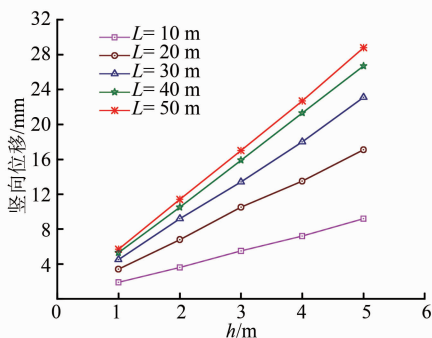


图 9 不同河道开挖宽度下地铁隧道竖向位移与河道开挖深度的关系曲线

Fig. 9 Relationship curves of metro tunnel vertical displacement and river excavation depth under different river excavation widths

### 2.3.3 软土底埋深对地铁隧道变形的影响

地铁隧道位于地面下 15.5~21.7 m, 地铁隧道竖向位移随软土底埋深  $h_2$  的变化曲线如图 10 所示。由图 10 可知: 地铁隧道竖向位移随软土层厚度增加而不断增加。 $h_2$  从 0 增至 15.0 m 时, 地铁隧道竖向位移增加了 5.6%;  $h_2$  从 15.0 m 增至 22.2 m 时, 地铁隧道竖向位移增加了 14.3%;  $h_2$  从 22.2 m 增至 30.0 m 时, 地铁隧道竖向位移增加了 26.2%;  $h_2$  从 30.0 m 增至 50.0 m 时, 地铁隧道竖向位移增加了 117.5%。由此可知, 地铁隧道上方土层的土性对地铁隧道变形的影响最小, 其次为地铁隧道区域埋深土层, 而改变地铁隧道下方土层的土性, 对地铁隧道变形的影响最大。地铁隧道竖向位移主要由其下方土体回弹变形产生。

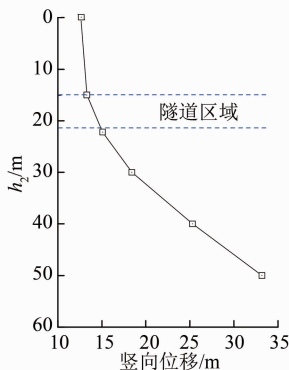


图 10 地铁隧道竖向位移随软土底埋深变化曲线

Fig. 10 Curve of metro tunnel vertical displacement changing with buried depth of soft soil bottom

## 3 河道开挖时下方地铁隧道的变形控制措施

为减少河道土体开挖对下方地铁隧道变形的影

响, 专家学者们提出了多种措施, 包括土体加固措施<sup>[8]</sup>、设置门架式梁板措施<sup>[5-7]</sup>等。本文以图 7 所示的计算模型为基准模型, 分别考虑门架式土体加固措施及门架式梁板加固措施, 并将考虑了控制变形措施的计算模型与基准模型的有限元计算结果进行比较分析。

### 3.1 门架式土体加固措施

对地铁隧道结构上方及两侧土体进行门架式加固, 其加固措施如图 11 所示。采用  $\phi$  850 mm@600 mm 三轴搅拌桩, 搅拌桩水泥掺量为 20%, 加固土体的 28 d 无侧限抗压强度大于 1.0 MPa, 两侧加固土体深度为 15.0 m。

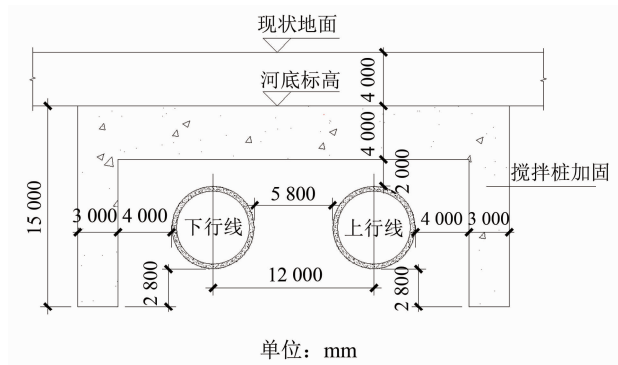


图 11 门架式土体加固措施示意图

Fig. 11 Diagram of gantry-type soil reinforcement measures

由计算结果可知: 在搅拌桩施工阶段, 由于地铁隧道上方土体自重有所增加, 地铁隧道沉降的计算值为 5.9 mm; 在河道开挖到坑底时, 地铁隧道隆起量计算值为 17.1 mm, 与基准模型相比减少了 4.9 mm。由此可见, 对于门架式土体加固措施, 开挖前土体加固施工增加了地铁隧道上方土体的自重, 达到了减少地铁隧道隆起变形的效果。

### 3.2 门架式梁板加固措施

门架式梁板加固措施如图 12 所示。在河底设置 400 mm 厚的底板。底板下设梁, 梁下设直径为 600 mm 的钻孔灌注桩。灌注桩桩长为 40 m, 桩间距为 4 m。

由计算结果可知: 门架式梁板加固措施效果明显。在桩基施工阶段, 地铁隧道沉降计算值为 0.8 mm; 河道开挖到坑底时, 地铁隧道的隆起量计算值为 7.2 mm, 与基准模型相比减少了 14.8 mm。

## 4 结语

1) 在土体加固和河道开挖阶段, 下方地铁隧道变形分别表现为沉降和隆起。隆起变形主要发生在

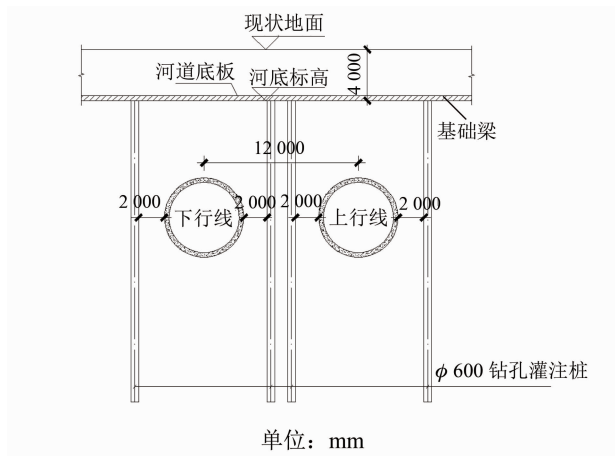


图 12 门架式梁板加固措施示意图

Fig. 12 Diagram of gantry-type beam-slab reinforcement measures

地铁隧道正上方土体开挖时。

2) 地铁隧道隆起变形随  $L$  的增加呈非线性增长;  $L$  超过一定数值后, 隆起变形趋于稳定; 河道开挖断面面积相同时, 减小  $h$ , 增加  $L$ , 有利于减少地铁隧道变形。

3) 改变地铁隧道下方土层的土性, 对地铁隧道变形的影响最大。地铁隧道竖向位移主要由其下方土体回弹变形产生。

4) 采用门架式土体加固措施时, 开挖前的土体加固施工增加了地铁隧道上方土体的自重, 达到了减少隧道隆起变形的效果; 采用门架式梁板加固措施时, 地铁隧道隆起变形的控制效果明显。

## 参考文献

- [1] 张丽娟, 孙巍, 谢明, 等. 竖向近距离卸载对既有隧道影响的数值分析[J]. 地下空间与工程学报, 2010, 6(增刊1): 1408.
- ZHANG Lijuan, SUN Wei, XIE Ming, et al. Numerical analysis of the influence of unloading on an existing tunnel in close distance [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2010, 6(S1): 1408.
- [2] 姚燕明, 杨金刚, 王哲. 分析基坑开挖对其下卧隧道、管线变形的影响[J]. 地下空间与工程学报, 2013, 9(增刊2): 2029.

YAO Yanming, YANG Jingang, WANG Zhe. Analysis on influence of the foundation pit excavation on the deformation of subjacent tunnels and pipelines[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2013, 9(S2): 2029.

- [3] 姚宏波, 李冰河, 童磊, 等. 考虑空间效应的软土隧道上方卸荷变形分析[J]. 岩土力学, 2020, 41(7): 2453.
- YAO Hongbo, LI Binghe, TONG Lei, et al. Analysis of metro tunnel deformation by upper excavation unloading considering spatial effect in soft soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(7): 2453.
- [4] 姚燕明, 杨金刚, 王哲. 宁波地铁盾构隧道上方基坑开挖影响案例分析[J]. 都市快轨交通, 2014, 27(4): 93.
- YAO Yanming, YANG Jingang, WANG Zhe. Case analysis of the influence of foundation pit excavation above the shield tunnel of Ningbo Metro[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2014, 27(4): 93.
- [5] 宋顺龙. 河道开挖对下伏地铁盾构隧道的影响及保护[J]. 工业建筑, 2017, 47(增刊1): 485.
- SONG Shunlong. The influence and protection of metro tunnels when river excavation above it[J]. Industrial Construction, 2017, 47(S1): 485.
- [6] 王正波. 区间隧道上方土体卸载保护方案研究及数值影响分析[J]. 隧道与轨道交通, 2019(4): 47.
- WANG Zhengbo. Study on soil unloading protection scheme above interval tunnel by numerical influence analysis[J]. Tunnel and Rail Transit, 2019(4): 47.
- [7] 刘尊景, 周奇辉, 陈昌平. 河道施工对下卧地铁隧道的影响和保护措施[J]. 人民黄河, 2019, 41(增刊2): 120.
- LIU Zunjing, ZHOU Qihui, CHEN Changping. Influence of river course construction on the underlying subway tunnel and its protection measures[J]. Yellow River, 2019, 41(S2): 120.
- [8] 王国权. 河道开挖对正下方盾构隧道变形影响分析[J]. 土工基础, 2021, 35(3): 290.
- WANG Guoquan. Impact analysis of river excavation on the deformation of an underlying shielded tunnel[J]. Soil Engineering and Foundation, 2021, 35(3): 290.

· 收稿日期: 2021-12-22 修回日期: 2022-03-16 出版日期: 2024-04-10  
Received: 2021-12-22 Revised: 2022-03-16 Published: 2024-04-10  
· 第一作者: 叶如, 高级工程师, yeru@nbmetro.com  
通信作者: 曾婕, 高级工程师, 287396552@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

欢迎访问《城市轨道交通研究》网站

<http://umt1998.tongji.edu.cn>