

# 盾构下穿施工对既有城市道路沉降影响研究

南钰<sup>1</sup>, 严中<sup>2</sup>, 陈凯<sup>3</sup>, 翟朝娇<sup>1</sup>

1. 安徽建筑大学 土木工程学院, 安徽 合肥 230601;
2. 合肥市市政设计研究总院有限公司, 安徽 合肥 230041;
3. 中铁二十四局集团安徽工程有限公司, 安徽 合肥 230011)

**摘要:** 以合肥市地铁建设四号线天水路站-翠柏路站盾构区间为工程背景, 研究盾构下穿对既有城市道路造成的影响。运用 Midas GTS NX 建立数值分析模型, 研究隧道埋深和开挖距离对道路沉降的影响。结果显示: 先开挖左线时, 沉降在开挖第五到第十环过程中发生突变; 埋深在 2D 以内时, 随着开挖的进行, 沉降曲线从“单谷”转为“双谷”, 但沉降峰值始终保持在左线隧道中心线附近; 埋深超过 2D, 双线隧道的相互作用可以忽略, 全线贯通时的沉降峰值出现在双线隧道中心线上方; 埋深始终与影响范围成正比, 与影响程度成反比。合理安排这两种因素能够有效控制道路沉降, 保证施工安全。

**关键词:** 盾构下穿; 隧道埋深; 开挖距离; 沉降峰值

中图分类号: U455.43

文献标识码: A

文章编号: 2095-8382(2022)04-043-05

## Wear under Shield Construction for Both City Road Subsidence Impact Study

NAN Yu<sup>1</sup>, YAN Zhong<sup>2</sup>, CHEN Kai<sup>3</sup>, ZHAI Chaojiao<sup>1</sup>

1. College of Civil Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, China;
2. Hefei Municipal Design Research Institute Co., Ltd., Hefei 230041, China;
3. China Railway 24th Construction Bureau Group Anhui Engineering Co., Ltd., Hefei 230011, China)

**Abstract:** Taking the shield interval from Tianshui Lu Station to Cuibai Lu Station of Hefei Metro Line 4 project as the example, the impact of shield underpassing on existing urban roads was studied. A numerical analysis model was established using Midas GTS NX to study the effects of tunnel depth and excavation distance on road settlement. The results show that when the left line is excavated first, the sudden settlement occurs during the excavation of the fifth to tenth ring; when the buried depth is within 2D, the settlement curve changes from single valley to double valleys, but the peak remains near the center line of the left tunnel; when the buried depth exceeds 2D, the interaction between the two tunnels can be ignored, and the settlement peak appears above the center line of the two tunnels when the whole line is completed. Besides, the buried depth is always proportional to the influence range and inversely proportional to the influence degree. Hence, the reasonable arrangement of these two factors can effectively control road settlement and ensure construction safety.

**Keywords:** shield under wear; tunnel buried depth; the excavation distance; sedimentation peak

在城市化进程的加速推动下,地面交通已不能满足人们日常出行需要,因此在大中型城市建设地

下轨道显得至关重要<sup>[1]</sup>。由于大中型城市地铁线路密度大,且市区范围内公路、铁路及管道分布密

收稿日期: 2021-10-10

基金项目: 安徽省高等学校自然科学基金重点项目(KJ2019A0742)

作者简介: 南钰(1997-),男,硕士研究生,研究方向: 地下结构工程。

集,在复杂地质条件以及日渐增加的地下空间利用率下合理施工成为我们研究的关键。

盾构下穿对既有结构影响的研究近年来已经取得了不小的成就,并且指导了多个相关工程案例顺利实施。20 世纪 60 年代,Peck<sup>[2]</sup> 研究得出,地面以 U 型槽形式发生沉降,基于对大量数据的分析,提出了 Peck 公式。甘晓露等<sup>[3]</sup> 利用 Pasternak 弹性地基梁模型和 Loganathan-Polous 解,证明了隧道间距变化会引起地表沉降和隧道弯矩变化。王忠凯等<sup>[4]</sup> 在运用应力路径法预测地表变形的基础上,结合隧道间距和沉降的关系,证明了应力路径法的特殊性。杜明芳等<sup>[5]</sup> 基于洛阳市轨道交通 2 号线的现场监测数据,对大粒径卵石地层中盾构开挖对上部道路沉降影响规律进行研究。宋卫东等<sup>[6]</sup> 通过建立三维数值模型,揭示了在盾构开挖过程中,土体的竖向和横向位移都会由于挤压作用而产生变化,且开挖面附近最为剧烈。赵丽雅等<sup>[7]</sup> 研究并总结了铁路轨道走向与地表沉降变化之间的关系,并得出可以通过增大注浆体弹性模量的方式来减小地表变形。

以上研究主要论证隧道间距,隧道所处地层性质以及隧道周围注浆条件等因素对道路沉降的影响,但目前涉及作为主要影响因素的隧道埋深和开挖距离的研究还不充分,为此,本文将针对这两种因素下的各类工况,基于数值分析的方法,揭示盾构下穿施工时城市道路的沉降规律,以期为国内类似工程案例提供参考和借鉴。

## 1 工程概况

以合肥市轨道交通四号线天水路站—翠柏路站盾构区间工程为依托,区间分别经过合肥东编组站及其北侧空地、规划铜陵北路到达翠柏路站。盾构隧道内径为  $\Phi 5\ 400\text{ mm}$ ,管片厚度为 300 mm,宽

度为 1 500 mm,管片混凝土为 C50P10。共观测到两层地下水,地下水类型为上层滞水、基岩裂隙水。盾构区间标准断面及土层物理力学性质参数如图 1 和表 1 所示。

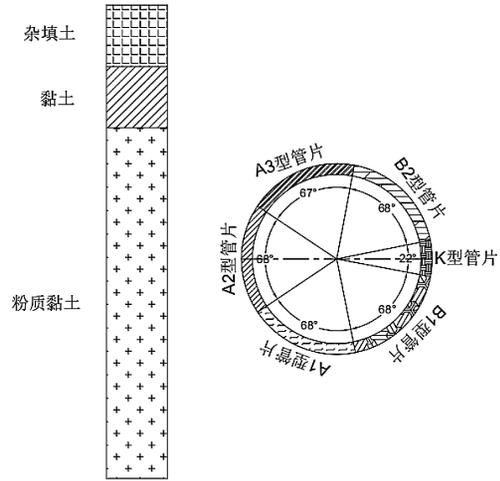


图 1 盾构区间标准断面图

## 2 有限元模型建立

### 2.1 计算模型建立

本模型各参数确立拟依据现场施工情况。为了满足隧道开挖的边界条件,依据圣维南原理,在隧道周边填充的边界应不小于隧道外径的三倍且不大于隧道外径的五倍<sup>[8]</sup>。为了尽量减小边界效应的影响,本模型长度取  $10D=60\text{ m}$  (左右边界各取  $4.5D$ ),宽度取  $5D=30\text{ m}$ ,总高度取  $7D+0.8\text{ m}=42.8\text{ m}$  (上下边界各取  $3D$ )。本模型最上部为一层厚度 0.8 m 的路基,路基下为四种不同性质的土层,自上而下分别为杂填土、黏土、粉质黏土、全风化泥质砂岩,厚度依次为 3 m、3 m、26 m、10 m。隧道拱顶至地表距离为 12 m,隧道间距为 12 m。按照上文对模型的描述,建立如图 2 和图 3 的模型。

表 1 土层物理力学性质参数

岩土名称	层厚 /m	天然重度 $\gamma/\text{kN/m}^3$	压缩模量 $E/\text{MPa}$	粘聚力 $C/\text{KPa}$	内摩擦角 $\varphi$	泊松比 $\nu$
路基	0.8	19.6	101	71	37.6	0.22
杂填土	3	17.5	8	5	8	0.35
黏土	3	19.6	11	55	15	0.36
粉质黏土	26	20	10	35	12	0.37
全风化岩	10	21	12	30	16	0.31

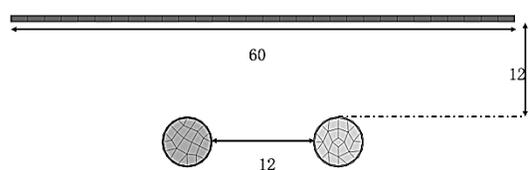


图2 道路与隧道相对位置图

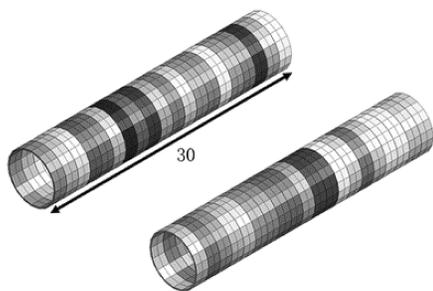


图3 注浆环视图

模型有 32 125 个单元,150 831 个节点。其中土层和路基采用修正-摩尔库伦本构关系,管片、盾壳等均视为线弹性本构模型<sup>[9]</sup>。施工过程中依次采用改变属性功能将注浆层原先为土体的地方更改为注浆材料属性。前、后、左、右四个边界面采用法向约束,模型最下层施加纵向位移约束以起到约束土层不横向变形的作用<sup>[10]</sup>。各材料物理力学性能参数(参考现场施工报告和资料)如表 2 所示。

## 2.2 施工过程模拟

本模型全长 30 m,每次开挖一环管片衬砌,宽

度为 1.5 m,且左线先行。开挖过程中盾构外壳先行,注浆和开挖区域同时钝化,并激活作用在下一开挖面上的掌子面压力。在此基础上,每条线开挖从第二步开始,都要依次激活管片、千斤顶力和注浆压力,并且将原注浆区域的参数转化为注浆材料,同时钝化前一阶段的盾构外壳和千斤顶力。

## 2.3 计算工况

为了研究隧道在不同埋深以及开挖不同距离时,盾构施工对既有城市道路沉降变形影响,拟采用不同工况进行分析,不同埋深的工况(保持隧道间距恒定,埋深取 1.5D~3.5D 范围内偶数值)如表 3 所示。

同时,固定隧道埋深和间距均为 12 m 时,按照先开挖左线的顺序,每开挖 7.5 m 设置一个工况,直至全线贯通。

## 2.4 模型验证

通过实测及模拟数据的对比,验证了模型的正确可行性,对比结果如图 4 和图 5 所示。由图可知,不论是在左线贯通还是全线贯通时,所得到的规律曲线都是保持相同的形态(左线“单谷”,全线“双谷”),且左线贯通的最大沉降差不超过 2 mm,全线贯通的最大沉降差不超过 3 mm,均不超过实测沉降最大值的 30%<sup>[11]</sup>。这是由于实际施工中土体参数和施工方式的各项差异导致,在合理范围内。因此,本数值分析模型基本符合实际施工情况。

表 2 各材料物理力学性能参数

结构名称	天然重度 $\gamma/\text{kN/m}^3$	弹性模量 /MPa	泊松比 $\nu$	厚度 /mm	混凝土等级
管片	23.9	3405	0.18	300	C50
盾构外壳	79.2	150000	0.34	50	—
注浆材料	23.9	3000	0.18	150	C30

表 3 计算工况

工况	隧道埋深	隧道间距	注浆压力	掌子面压力	千斤顶力
工况一	10m	12m	0.15MPa	0.15MPa	0.15MPa
工况二	12m	12m	0.15MPa	0.15MPa	0.15MPa
工况三	14m	12m	0.15MPa	0.15MPa	0.15MPa
工况四	16m	12m	0.15MPa	0.15MPa	0.15MPa
工况五	18m	12m	0.15MPa	0.15MPa	0.15MPa
工况六	20m	12m	0.15MPa	0.15MPa	0.15MPa

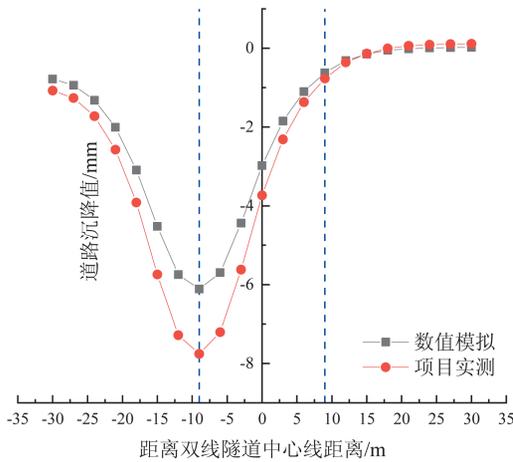


图 4 左线贯通时 Y=0 断面处路基沉降曲线

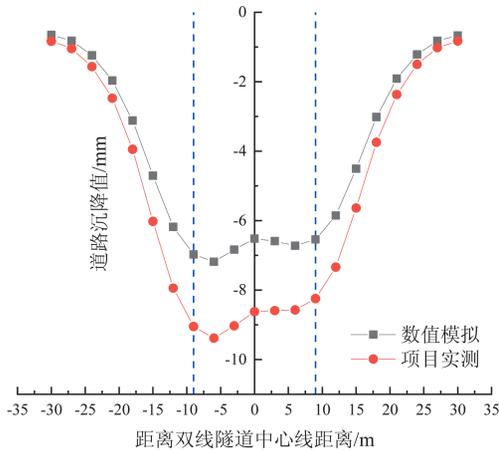


图 5 双线贯通时 Y=0 断面处路基沉降曲线

### 3 计算结果分析

#### 3.1 隧道开挖距离的影响研究

为有效控制施工过程中隧道上方土层的变形,在隧道埋深为 12 m、间距为 12 m 的条件下,研究不同开挖距离与路基沉降之间的规律。通过分析不同工况下路基的沉降数值,可以得到如图 6 所示的沉降值对比图以及路基沉降结果汇总表 4。

通过研究表中数据变化可知,当左线开挖到第五环也就是 7.5 m 处时,左线隧道上方的路基部分已经出现了显著的沉降,量值为 4.13 mm;开挖不

断加强土层扰动,从 7.5 m 到 15 m 的过程中扰动最强,从 4.13 mm 突增至 6.80 mm,沉降量差值超过了 2 mm,而此后每一步最大沉降差值都不超过 0.6 mm。这说明隧道在初始开挖阶段对上部土体变形的影响要大于开挖深入阶段,原因是随着管片的拼装,注浆总压力增大,注浆部分的浆液也逐渐凝结,从而限制了上部土体的下沉。

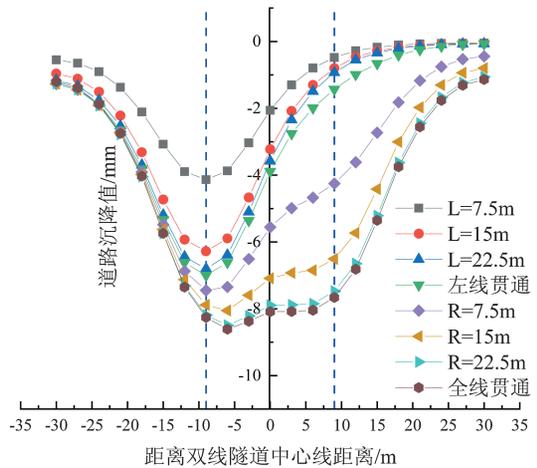


图 6 不同开挖距离下的路基沉降对比图

由图 6 可知,随着左线开挖完成,路基最大沉降的位置仍然在左线隧道中心线处,但右线隧道上方土体也开始出现少量沉降。并且随着左线贯通,右线隧道开挖,路基沉降的最大值逐渐向双线隧道中心线方向移动,沉降值由两侧隧道向双线隧道中心线处减小,这是由于双线隧道开挖过程中,左右隧道之间的土体可能会产生垂直地面向上的挤压作用。并且左线隧道上部的土体始终保持着一定的下沉速率,这说明隧道开挖并非各自独立的。

#### 3.2 隧道不同埋深的影响研究

周围土体会因为开挖的推进而受到扰动,从而产生地层损失,而这种损失传递到地表则产生了沉降。现将隧道埋深依次取为 10 m、12 m、14 m、16 m、18 m、20 m,并将工况一至六依次添加进模型计算,分别得到各工况下的路基沉降对比图,如下图 7 和 8 所示。

表 4 路基沉降结果汇总表

开挖距离 /m	最大沉降变形 /mm	开挖距离 /m	最大沉降变形 /mm	开挖距离 /m	最大沉降变形 /mm
L=7.5	4.13	左线贯通	6.99	R=22.5	8.49
L=15	6.27	R=7.5	7.34	全线贯通	8.60
L=22.5	6.80	R=15	8.05		

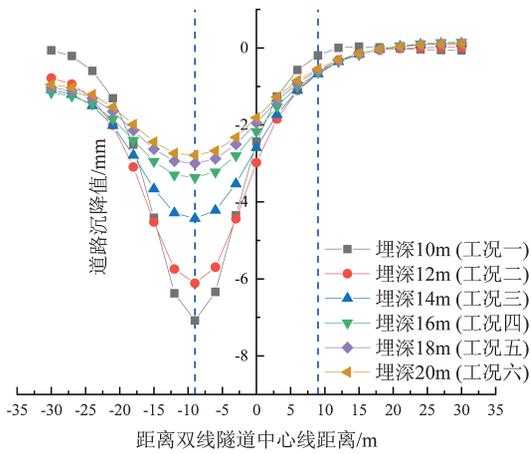


图 7 左线贯通时六种工况下路基沉降值对比图

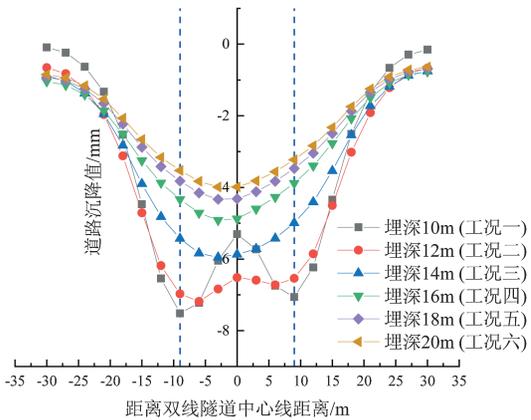


图 8 全线贯通时六种工况下路基沉降值对比图

如图 7 所示,当左线全部贯通之后,沉降最大值出现在左线隧道中心处。隧道对上部路基沉降的影响随着埋深的增大越来越小,曲线峰值不断减小,从 7.08 mm 减小到 2.68 mm,并且发现沿 X 轴正方向距离左线中心线左侧最远处的沉降量始终大于距离左线中心线右侧最远处的沉降量,这说明离盾构隧道越近的土层受到施工的影响越大。

从图 8 看出,全线贯通时,当隧道埋深较浅,沉降曲线呈现“双谷”的形式<sup>[12]</sup>,并且“谷底”始终分布在左右线隧道中心处。同时随着埋深的增大(从 10 m 增加到 20 m),“谷峰”逐渐平缓,沉降槽逐渐增大,说明盾构施工对土层的影响逐渐减小。当埋深达到 14 m 时,曲线又重新恢复为“单谷”形式。同时,从图中也可以明显看出,在埋深为 10 m 时,最大沉降值出现在左线隧道中心处。而随着埋深增大,最大沉降值位置逐渐平移到双线隧道中心处,这说明先行隧道上部土体会受到来自后行隧道开挖过程的影响,从而导致累计沉降量始终较大(埋深从 10 m 到 20 m 的过程中,左线隧道中心处沉降量占双线最大沉降量的比例是 93%~67%)。但当埋深大到一定程度时,这种影响几乎可以忽略,届时最大沉降的位置一定是出现在两隧道中心线正上方。表 5 统计了六种埋深下路基的沉降结果。

由表 5 可知,全线贯通时的路基沉降最大值始终大于同埋深下的左线贯通,并且随着埋深的增加,全线贯通时沉降曲线的沉降槽宽度也在逐渐增大,说明对上部路基的影响越来越小。

#### 4 结论

本文主要采用数值模拟的方法,以合肥轨道交通四号线天水路站—翠柏路站区间工程为依托,对隧道在不同埋深和不同开挖距离下对城市道路产生的影响进行研究,得出主要结论如下:

(1) 左线隧道在开挖第五环到第十环内,沉降差值最大。超过 2 mm,并且随着右线隧道开始动工,路基沉降最大值逐渐向两隧道中心线方向移动。

表 5 六种隧道埋深下路基沉降结果统计

隧道埋深 / m	左线贯通路基沉降最大值 / mm	全线贯通路基沉降最大值 / mm	左线沉降量占最大沉降量的比例 / %	全线贯通沉降槽范围 / m
10	7.08	7.59	93.28	32
12	6.11	7.18	85.09	34
14	4.43	5.96	74.32	42
16	3.36	4.93	68.15	56
18	2.99	4.43	67.95	58
20	2.68	3.99	67.16	60

(下转第 60 页)

- 2020, 27 (5): 250–258.
- [11] 褚琳, 张欣然, 王天巍, 等. 基于 CA-Markov 和 InVEST 模型的城市景观格局与生境质量时空演变及预测 [J]. 应用生态学报, 2018, 29 (12): 4106–4118.
- [12] Gomes E, Inácio M, Bogdzevič K, et al. Future scenarios impact on land use change and habitat quality in Lithuania[J]. Environmental Research, 2021, 197: 111101.
- [13] Chen M J, Bai Z K, Wang Q R, et al. Habitat quality effect and driving mechanism of land use transitions: a case study of Henan water source area of the middle route of the south-to-north water transfer project[J]. Land, 2021, 10 (8): 796.
- [14] Yang Y Y. Evolution of habitat quality and association with land-use changes in mountainous areas: a case study of the Taihang Mountains in Hebei Province, China[J]. Ecological Indicators, 2021, 129: 107967.
- [15] 黄木易, 岳文泽, 冯少茹, 等. 基于 InVEST 模型的皖西大别山区生境质量时空演化及景观格局分析 [J]. 生态学报, 2020, 40 (9): 2895–2906.
- [16] Rangel-Buitrago N, Neal W J, de Jonge V N. Risk assessment as tool for coastal erosion management[J]. Ocean & Coastal Management, 2020, 186: 105099.
- [17] Getis A, Ord J K. The analysis of spatial association by use of distance statistics[J]. Geographical Analysis, 2010, 24 (3): 189–206.
- [18] Li C, Li F B, Wu Z F, et al. Exploring spatially varying and scale-dependent relationships between soil contamination and landscape patterns using geographically weighted regression[J]. Applied Geography, 2017, 82: 101–114.
- [19] Anselin L. Spatial Econometrics: Methods and Models[M]. Dordrecht, Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1988.
- [20] 陈明星, 陆大道, 张华. 中国城市化水平的综合测度及其动力因子分析 [J]. 地理学报, 2009, 64 (4): 387–398.
- [21] Zhu C M, Zhang X L, Zhou M M, et al. Impacts of urbanization and landscape pattern on habitat quality using OLS and GWR models in Hangzhou, China[J]. Ecological Indicators, 2020, 117: 106654.
- [22] 杨肃昌, 孔晴, 徐立君. 产业和人口集聚对环境污染的影响: 基于省级层面的实证 [J]. 统计与决策, 2020, 36 (14): 55–60.

(上接第 47 页)

(2) 由于开挖过程中双线隧道间的互相作用, 导致埋深在 2D 以内时, 隧道间的土体会受到挤压而向上移动, 使得沉降曲线随着开挖的进行逐渐变为“双谷”形式, 但沉降峰值始终出现在左线隧道中心线附近。

(3) 当埋深增加至 2D 到 3.5D 之间时, 左线贯通的曲线峰值出现在左线隧道中心线处, 全线贯通的曲线峰值出现在双线隧道中心线处并且埋深与影响范围成正比, 与影响程度成反比。本文仅研究了埋深在 1.5D~3.5D 的情况, 建议增加隧道埋深的范围, 并研究施工时的其他参数对路基沉降有何种影响。

#### 参考文献:

- [1] 严鹏飞, 殷建光, 葛新辉, 等. 不同埋深隧道开挖对地表沉降影响的三维有限元分析 [J]. 广西大学学报 (自然科学版), 2021, 46 (1): 60–66.
- [2] 胡幼常, 陈晓鸣, 毛爱民, 等. 考虑地震荷载的加筋粗粒土坡安全系数简化计算方法 [J]. 武汉理工大学学报 (交通科学与工程版), 2017, 41 (6): 943–948.
- [3] 甘晓露, 俞建霖, 龚晓南, 等. 新建双线隧道下穿对既有盾构隧道影响研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39 (S2): 3586–3594.
- [4] 王忠凯, 徐光黎. 基于三轴试验和联合强度理论预测盾构施工引起的地表变形 [J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38 (9): 1928–1936.
- [5] 杜明芳, 朱东东, 易领兵, 等. 大粒径卵石地层中盾构下穿既有铁路的影响分析 [J]. 合肥工业大学学报 (自然科学版), 2020, 43 (5): 660–666, 720.
- [6] 宋卫东, 陈瑞宏, 杜建华, 等. 北京地铁 10 号线国贸—双井区间土压平衡盾构施工数值模拟研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27 (S2): 3401–3407.
- [7] 赵丽雅, 许宏发, 晋学辉, 等. 盾构隧道下穿铁路群的路基加固及沉降分析 [J]. 水利与建筑工程学报, 2017, 15 (4): 85–90.
- [8] 高攀, 李文杰. 隧道相似模型中试验边界尺寸选取的探讨 [J]. 低温建筑技术, 2019, 41 (1): 81–85.
- [9] 高玄涛. 后建车站基坑开挖及区间近距离下穿既有车站安全技术措施研究 [J]. 贵州大学学报 (自然科学版), 2019, 36 (4): 101–110.
- [10] 朱荣军, 席培胜, 王枫, 等. 盾构施工对地表沉降的数值模拟分析 [J]. 佳木斯大学学报 (自然科学版), 2018, 36 (3): 346–349.
- [11] 张印涛, 陶连金, 边金. 盾构隧道开挖引起地表沉降数值模拟与实测分析 [J]. 北京工业大学学报, 2006, 32 (4): 332–337.
- [12] 马少坤, 邵羽, 刘莹, 等. 不同埋深盾构双隧道及开挖顺序对临近管线的影响研究 [J]. 岩土力学, 2017, 38 (9): 2487–2495.