

DOI: 10.11779/CJGE2024S10015

# 双隧道开挖对浅基础建筑物沉降影响的研究

李建东<sup>1</sup>, 元光宗<sup>2</sup>, 边天奇<sup>2</sup>, 赵跃<sup>2</sup>, 安晓宇<sup>1</sup>

(1. 交通运输部天津水运工程科学研究所, 天津 300456; 2. 天津大学建筑工程学院, 天津 450001)

**摘要:** 基于离心模型试验和数值模拟计算, 对两条平行开挖的跨江隧道引起的上部浅基础建筑物和地表沉降规律进行了研究。结果表明: 浅基础建筑物不同监测点位的沉降量均随土体体积损失率的增大而增大。随着土体体积损失率的增加, 上部浅基础建筑物的不均匀沉降增加, 隧道上方的土体的竖向位移逐渐增大, 沉降槽的范围逐渐增大。本项目中隧道间距为 1 倍洞径条件下, 左右隧道开挖顺序的改变会对上部建筑物沉降量和地面最大沉降量影响较小, 但先开挖隧道拱顶处的地面沉降要大于后开挖隧道拱顶处的地面沉降。

**关键词:** 双隧道开挖; 浅基础建筑物; 地表沉降; 体积损失率; 开挖顺序

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2024)S1-0147-05

**作者简介:** 李建东(1985—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事岩土工程离心模型试验等方面的研究工作。E-mail: jiangdongli09@163.com。

## Influences of twin-tunnel excavation on settlement of shallow foundation buildings

LI Jiandong<sup>1</sup>, YUAN Guangzong<sup>2</sup>, BIAN Tianqi<sup>2</sup>, ZHAO Yue<sup>2</sup>, AN Xiaoyu<sup>1</sup>

(1. Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, MOT, Tianjin 300456, China; 2. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 450001, China)

**Abstract:** Based on the centrifugal model tests and numerical calculations, the settlement laws of the upper shallow foundation buildings and ground caused by twin tunnel excavation are studied. The results show that the settlements of different monitoring points in the shallow foundation buildings increase with the increase of soil loss rate. As the soil loss rate increases, the uneven settlements of the upper shallow foundation buildings increase, the vertical displacements of the soil above the tunnel gradually increase, and the range of the settlement trough gradually increases. Under the tunnel spacing of 1D in this project, changes in the excavation sequence of the two tunnels have a relatively small impact on the settlements of the upper buildings and the maximum ground settlement. However, the ground settlements at the tunnel vault excavated first is greater than those at the tunnel vault excavated later.

**Key words:** twin-tunnel excavation; shallow foundation building; ground settlement; soil loss rate; excavation sequence

## 0 引言

随着中国城市化进程的发展, 人员向主要大城市集中, 城市用地紧缺、交通拥堵问题促使地下空间的开发得到了广泛重视。盾构隧道因其施工效率高、对地面交通影响小的优点得到了广泛的应用。但新开挖隧道难免会下穿城市路段, 盾构施工过程中诱发的土体扰动会对上方建筑物和地面沉降产生影响。

针对隧道开挖引起的建筑物和地面沉降问题, 国内外学者通过理论分析<sup>[1-3]</sup>、现场监测<sup>[4-5]</sup>、试验研究<sup>[6-8]</sup>和数值模拟<sup>[9-11]</sup>等手段开展了相应研究。因理论分析主要针对均一土层的弹性或黏弹性分析, 与工程实际存在一定的差距, 现场监测数据对不同地区的应用存在较大局限, 且人力财力花费较大。所以针对具体工程, 试验研究和数值模拟是更为合适的研究手段。利

用离心模型试验和数值模拟的手段, 研究双隧道开挖对上部建筑物和地面沉降规律的影响, 对类似工程建设具有一定的指导意义。

## 1 工程概况

本项目位于长江下游地区, 为两条跨江隧道平行开挖, 线路上方存在既有的办公楼。其中隧道埋深为 36 m, 左右两条隧道直径均为 15.5 m, 间距为 15.5 m, 衬砌厚度为 0.65 m。办公楼为浅基础房屋, 整体尺寸为 57 m×7 m×11 m (长×宽×高)。

针对该项目, 在交通运输部天津水运工程科学研

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目 (TKS20240401)

收稿日期: 2024-04-29

究院的大型土工离心机 TK-C500 上开展了的离心模型试验研究。在开展的离心模型试验研究的基础上，基于 PLAXIS 有限元软件分析双隧道开挖过程中的不同土体体积损失率和开挖顺序对上部浅基础建筑物和土体沉降规律的影响。

2 离心模型试验

2.1 试验设计

根据圣维南原理，随着远离开挖部位，开挖对周围岩体的影响将会逐渐消失。实践证明，地下洞室开挖后的应力应变，只是在洞室中心（3~5）倍隧道开挖高度（或宽度）范围内产生实际的影响。考虑到离心机吊篮尺寸限制，隧道开挖专用模型箱内部尺寸定为 1400 mm×700 mm×1000 mm，用于放置上部建筑物与土体，因此确定本次离心试验在 75g 条件下开展。

本次试验使用自研的推管隧道开挖装置对施工过程进行模拟，在隧道模型外部设置薄壁筒，薄壁筒的直径根据模型尺寸和土体损失率确定，将薄壁筒推出后土体向隧道模型运动，从而实现对隧道开挖的模拟，获得了隧道开挖过程中浅基础建筑物的沉降规律。隧道开挖装置如图 1 所示。

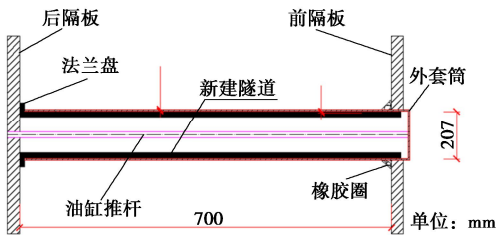


图 1 隧道开挖装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of tunnel excavation equipments

实际下穿工程中，盾构下穿区域的土体较为复杂，参考地质资料和地勘资料，把相似的土层进行简化合并。对现场取回的钻孔试样开展室内物理力学指标测试，并参考现场勘测资料确定试验用土和用砂指标，模型土层及砂层制模指标参数见表 1。

表 1 模型土体参数

Table 1 Soil parameters

土层分布	重度/ ( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ )	黏聚力/ kPa	内摩擦 角/( $^{\circ}$ )	压缩模量/ MPa	厚度/ mm
粉质黏土	18.8	3.2	22.8	8.2	217
砂土	19.5	0	36.0	10.9	100
粉质黏土	18.8	3.2	22.8	8.2	173
砂土	19.5	0	36.0	10.9	225

隧道上方的办公楼为浅基础建筑物，将基础上部荷载等效为 15 kN/m<sup>2</sup> 的均布荷载，简化为 8 mm 厚钢板；将柱下独立基础简化为条形基础，由铝管和 2 mm

厚钢板制成，图 2 为浅基础房屋试验模型示意图。

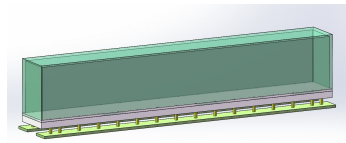


图 2 浅基础房屋示意图

Fig. 2 Schematic diagram of shallow foundation building

在浅基础模型基础上设置两个激光位移传感器，监测在隧道开挖过程中浅基础模型的沉降变化。离心模型试验布置方案如图 3 所示。

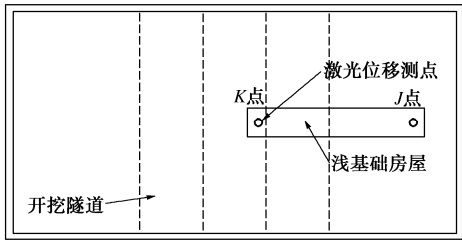


图 3 离心模型试验布置图

Fig. 3 Layout of centrifugal model tests

2.2 试验结果分析

试验过程中，先开挖浅基础建筑物正下方的右侧隧道，而后开挖距离较远的左侧隧道，得到浅基础建筑物不同监测点位的沉降变化如图 4 所示。开挖右侧隧道时，因浅基础房屋处于隧道正上方，因此两个监测点位都出现了明显的沉降。因 K 点更靠近右侧隧道，K 点沉降量大于 J 点沉降量。在左侧隧道开挖过程中，因房屋模型距离左侧隧道较远，开挖对浅基础房屋的影响较小。两条隧道开挖后，K 点沉降量为 2.16 cm，J 点沉降量为 1.44 cm。

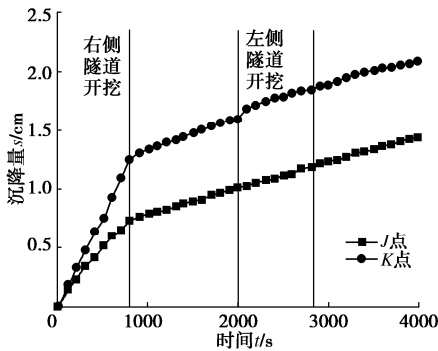


图 4 浅基础房屋沉降曲线

Fig. 4 Settlement curves of shallow foundation buildings

3 数值计算模型

本节在离心模型试验研究的基础上，基于 PLAXIS 有限元软件分析双隧道开挖过程中的不同土体体积损失率和开挖顺序对上部浅基础建筑物和土体沉降规律的影响。

3.1 数值分析模型的建立

采用 PLAXIS 软件建立双隧道开挖的模型, 将隧道范围内的土体冻结模拟开挖过程, 利用径向收缩法模拟土体损失, 对离心模型试验结果进行数值计算, 分析开挖过程引起的浅基础建筑物沉降量变化。所建立的数值模型如图 5 所示,  $X$  向垂直于隧道开挖方向,  $Y$  向为隧道长度方向,  $Z$  向为土层深度方向。土体共 4 层, 采用土体硬化本构模型, 参数根据离心试验所选用的土体参数进行选取, 隧道和浅基础房屋采用板单元进行模拟。隧道直径为 15.5 m, 间距为 1 倍洞径, 隧道中心处于下层粉质黏土和砂土交界面。土体计算参数见表 2, 结构模型计算参数见表 3。

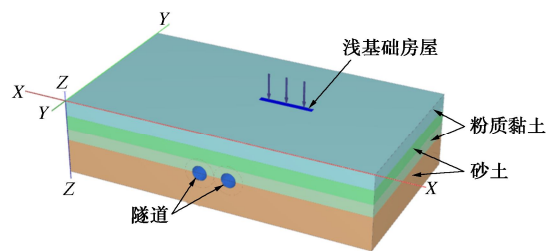


图 5 双隧道开挖数值计算模型

Fig. 5 Numerical model for twin-tunnel excavation

表 2 土体计算参数

Table 2 Soil parameters of numerical models

参数	符号	粉质黏土	砂土	单位
材料模型	Model	土体硬化	土体硬化	—
排水类型	Type	排水	排水	—
重度	$\gamma_{\text{sat}}$	18.8	19.5	$\text{kN/m}^3$
参考割线模量	$E_{50}^{\text{ref}}$	$8.2 \times 10^3$	$10.9 \times 10^3$	$\text{kN/m}^2$
参考加卸载模量	$E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$	$7.3 \times 10^3$	$10.9 \times 10^3$	$\text{kN/m}^2$
参考切线模量	$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$	$49.2 \times 10^3$	$44 \times 10^3$	$\text{kN/m}^2$
黏聚力	$C^{\text{ref}}$	3.2	0	$\text{kN/m}^2$
内摩擦角	$\Phi^{\circ}$	22.8	36	$^{\circ}$
泊松比	$\nu^{\text{ref}}$	0.3	0.1	—

表 3 结构模型计算参数

Table 3 Structural model parameters

类别	材料类型	厚度/ m	重度/ ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	弹性模量/ ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$ )	泊松比
隧道	弹性	0.65	25	$31 \times 10^6$	0.1
房屋	弹性	0.5	25	$25 \times 10^6$	0.1

本节在模拟过程中仅考虑隧道开挖和土体体积损失率, 不考虑盾构机顶进、衬砌拼装和注浆等施工过程, 具体计算步骤如下: ①采用程序默认  $K_0$  值生成初始应力; ②激活浅基础房屋模型和面荷载; ③开挖右侧隧道, 并激活隧道衬砌; ④右侧隧道收缩模拟土体损失; ⑤开挖左侧隧道, 并激活隧道衬砌; ⑥左侧隧道收缩模拟土体损失。

3.2 数值计算结果验证

分析计算两条间距为 1 倍洞径的隧道开挖的过程, 先开挖浅基础房屋正下方的右侧隧道, 而后开挖距离稍远的左侧隧道, 得到土体体积损失率为 1%条件下房屋监测点的沉降数据, 浅基础建筑物沉降数据如图 6 所示。因数值计算过程中隧道开挖和土体损失分为两步进行, 直径为 15.5 m 隧道内部土体开挖后, 打破了土体原有平衡, 底部土体向上运动。与离心模型试验中浅基础房屋沉降曲线相比,  $K$  点沉降曲线在左侧隧道开挖时出现回弹, 在隧道收缩后沉降量增大。离心试验与数值计算结果对比见表 4。

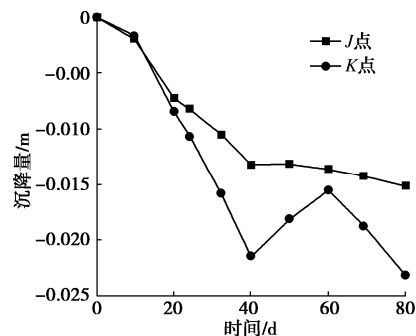


图 6 浅基础建筑物沉降曲线

Fig. 6 Settlement curves of shallow foundation buildings

表 4 离心试验与数值计算结果对比

Table 4 Comparison between centrifugal test and numerical results

监测点位	离心试验结果/cm	数值计算结果/cm	误差/%
$K$ 点	2.16	2.31	6.94
$J$ 点	1.44	1.51	4.86

对比离心模型试验与数值计算结果, 监测点位  $K$  点处的计算误差为 6.94%,  $J$  点处的计算误差为 4.86%, 说明数值计算的模型和方法可行。

4 土体体积损失率对沉降的影响

4.1 土体体积损失率对建筑物沉降的影响

盾构施工过程中刀盘超挖会造成地层损失, 引起的地表隆起或沉降。地层损失通常用体积损失率来表示, 即超挖土体体积与理论挖土体积的比值。

本节在上述数值计算结果验证的基础上, 分别对土体体积损失率 0.5%, 1%, 1.5%, 2% 对浅基础建筑物沉降的影响进行了计算分析, 建筑物沉降量随土体体积损失率的变化曲线如图 7 所示。从图 7 中可以看出, 浅基础建筑物不同监测点位的沉降量均随土体体积损失率的增大而增大, 位于右侧隧道上部的  $K$  点位沉降量大于  $J$  点, 且  $K$  点沉降量的变化量大于  $J$  点变化量。随着土体体积损失率的增加, 上部浅基础建筑物的不均匀沉降增加, 土体体积损失率为 0.5% 时不均匀沉降量仅为 2 mm, 当土体体积损失率增大至 2% 时,

不均匀沉降量增加到了 2.4 cm, 不均匀沉降较大时会引起上部浅基础建筑物倾斜, 开裂, 进而危及结构安全。因此, 在隧道开挖过程中, 严格控制隧道开挖过程中的土体损失可有效降低对上部建筑物的影响。

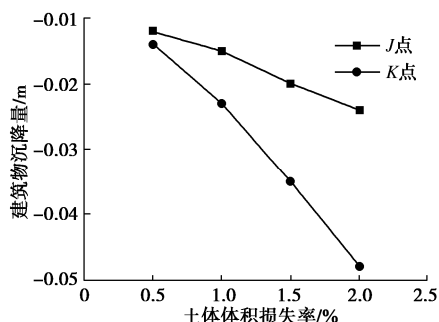


图7 建筑物沉降量随土体体积损失率变化曲线

Fig.7 Curves of building settlement with soil loss ratio

## 4.2 土体体积损失率对地表沉降的影响

隧道开挖对土体的扰动会引起地表土体发生变形, 在隧道上方的地表形成沉降槽。沉降槽的形态随隧道开挖过程中土体体积损失率的变化而变化。本文对土体体积损失率 0.5%, 1%, 1.5%, 2% 引起的地表沉降进行了数值分析。

图8 为非浅基础建筑物区域内的土体沉降云图, 随着隧道开挖过程中土体体积损失率的增加, 隧道上方的土体的竖向位移逐渐增大, 沉降槽的范围逐渐增大。

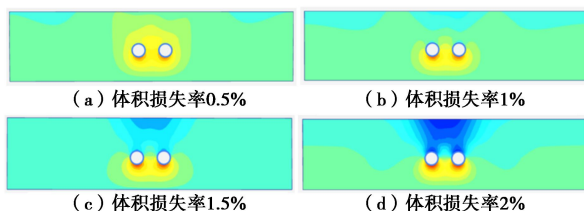


图8 非浅基础建筑物区域内的地面沉降云图

Fig. 8 Contours of ground settlement in non-shallow foundation building areas

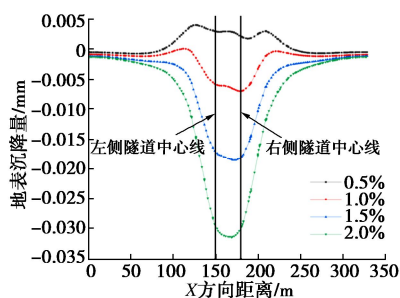


图9 隧道开挖引起地面沉降曲线

Fig. 9 Ground settlement curves caused by tunnel excavation

图9 为不同土体体积损失率的地面沉降变化曲线。当土体体积损失率为 0.5% 时, 隧道开挖引起的土体上浮量大于隧道收缩引起的沉降量, 隧道正上方土体微微隆起, 最大隆起量为 4 mm。土体体积损失率为 1% 时, 地表出现沉降。随着土体体积损失率的增

加, 隧道上方地表土体沉降量出现增大的趋势, 且土体体积损失率越大, 塌陷范围越大。地表最大沉降量出现在右侧隧道拱顶附近, 且右侧隧道拱顶处的地面沉降大于左侧隧道拱顶处的沉降。

## 5 开挖顺序对沉降的影响

为研究隧道开挖顺序对浅基础建筑物和地面沉降的影响, 本节对先开挖左侧隧道, 后开挖右侧隧道进行了数值模拟, 分析沉降规律。

### 5.1 开挖顺序对建筑物沉降的影响

从图10可以看出, 建筑物位于右侧隧道上部的 K 点沉降量几乎不受开挖顺序的影响, 远离右侧隧道的 J 点沉降量有差异, 先开挖右侧隧道比先开挖左侧隧道时沉降量稍大, 最大差异仅为 2 mm。可以得出结论, 本项目中隧道间距为 1 倍洞径条件下, 左右两条隧道的先后开挖顺序对上部建筑物沉降量影响较小。

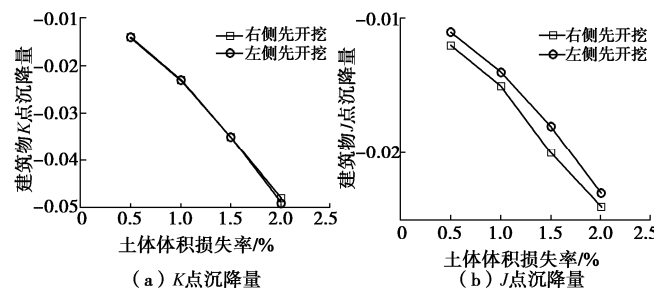


图10 建筑物沉降与开挖顺序的关系

Fig. 10 Relationship between building settlement and excavation sequence

### 5.2 开挖顺序对地表沉降的影响

由图11可以看出, 开挖顺序对地表最大沉降量几乎不存在影响, 且不同开挖顺序引起的沉降槽形态关于两条隧道中心呈对称分布。但明显可以看出, 先开挖隧道拱顶处的地面沉降要大于后开挖隧道拱顶处的地面沉降。后开挖隧道引起的土体位移会进一步增大先开挖隧道上部土体的变形。

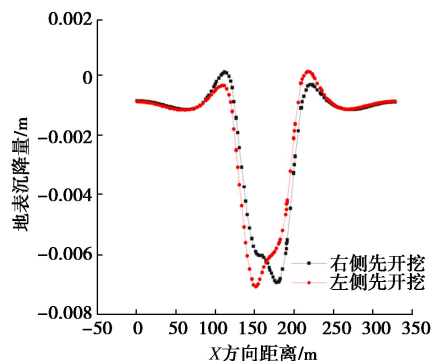


图11 不同开挖顺序引起的地面沉降

Fig. 11 Ground settlements caused by different excavation sequences



## 6 结 论

对双隧道开挖引起的浅基础建筑物和地面沉降规律进行了离心模型试验和数值模拟研究。在此基础上进行了土体体积损失率和开挖顺序对浅基础建筑物和地面沉降规律的数值计算分析, 得到 4 点结论。

(1) 浅基础建筑物不同监测点位的沉降量均随土体体积损失率的增大而增大, 位于右侧隧道上部的  $K$  点位沉降量大于  $J$  点, 且  $K$  点沉降量的变化量大于  $J$  点变化量。随着土体体积损失率的增加, 上部浅基础建筑物的不均匀沉降增加。

(2) 随着隧道开挖过程中土体体积损失率的增加, 隧道上方的土体的竖向位移逐渐增大, 沉降槽的范围逐渐增大。

(3) 本项目中隧道间距为 1 倍洞径条件下, 左右隧道开挖顺序的改变对上部建筑物沉降影响较小。

(4) 开挖顺序对地面最大沉降量几乎不存在影响, 先开挖隧道拱顶处的地面沉降要大于后开挖隧道拱顶处的地面沉降。

### 参考文献:

- [1] 欧阳文彪, 丁文其, 谢东武. 考虑建筑刚度的盾构施工引起沉降计算方法[J]. 地下空间与工程学报, 2013, 9(1): 155-160. (OUYANG Wenbiao, DING Wenqi, XIE Dongwu. Calculation method for settlement due to shield tunnelling considering structure stiffness[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2013, 9(1): 155-160. (in Chinese))
- [2] 朱逢斌. 盾构隧道施工对邻近多层框架结构建筑物的影响研究[D]. 南京: 东南大学, 2015. (ZHU Fengbin. The Influence to the Existed Multi-Story Frame Structure Due to Adjacent Shield Tunneling[D]. Nanjing: Southeast University, 2015. (in Chinese))
- [3] 薛文, 丁智, 秦建设, 等. 软土盾构隧道掘进对邻近浅基础建筑物影响研究[J]. 现代隧道技术, 2017, 54(2): 106-113. (XUE Wen, DING Zhi, QIN Jianshe, et al. Influence of shield tunnelling in soft soil on adjacent buildings with shallow foundations[J]. Modern Tunnelling Technology, 2017, 54(2): 106-113. (in Chinese))
- [4] 李海. 盾构隧道下穿建筑物控制技术和监测[J]. 铁道建筑, 2011, 51(9): 66-68. (LI Hai. Control technology and monitoring of shield tunnel passing under buildings[J]. Railway Engineering, 2011, 51(9): 66-68. (in Chinese))
- [5] 魏纲, 叶琦, 虞兴福. 杭州地铁盾构隧道掘进对建筑物影响的实测分析[J]. 现代隧道技术, 2015, 52(3): 150-159. (WEI Gang, YE Qi, YU Xingfu. Field monitoring and analysis of the influence of shield tunnelling for the Huangzhou metro on existing buildings[J]. Modern Tunnelling Technology, 2015, 52(3): 150-159. (in Chinese))
- [6] 赵立财. 隧道开挖对既有建筑物影响的离心试验研究[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2022, 43(4): 54-66. (ZHAO Licai. Centrifuge test study on the influence of tunnel excavation on the existing buildings[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2022, 43(4): 54-66. (in Chinese))
- [7] 张宇亭, 安晓宇, 晋亚斐. 隧道开挖引起上部建筑物沉降的离心模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(增刊 2): 54-57. (ZHANG Yuting, AN Xiaoyu, JIN Yafei. Centrifugal model test study on settlement of superstructure caused by tunnel excavation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(S2): 54-57. (in Chinese))
- [8] 王云平. 隧道施工对地层及建筑物影响的模型试验研究[J]. 山西建筑, 2023, 49(16): 140-142. (WANG Yunping. Model test study on the influence of tunnel construction on stratum deformation and buildings[J]. Shanxi Architecture, 2023, 49(16): 140-142. (in Chinese))
- [9] 伍廷亮, 张建新, 孟光. 隧道盾构施工引起邻近建筑物及其桩基变形的数值分析[J]. 煤田地质与勘探, 2012, 40(6): 39-43. (WU Tingliang, ZHANG Jianxin, MENG Guang. Numerical analysis in the deformation of adjacent buildings and underground pile caused by tunnel shield construction[J]. Coal Geology & Exploration, 2012, 40(6): 39-43. (in Chinese))
- [10] 孙宇坤. 受盾构隧道施工影响的砌体结构房屋性状研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012. (SUN Yukun. Research on the Mechanical Behaviors of Masonry Building Induced by Shield Tunneling Construction[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012. (in Chinese))
- [11] 徐明, 邹文浩, 章龙管. 房屋刚度对隧道开挖引起的土体变形的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(4): 838-848. (XU Ming, ZOU Wenhao, ZHANG Longguan. Influence of building stiffness on soil deformation induced by tunnelling[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(4): 838-848. (in Chinese))

(编校: 胡海霞)