

黄土地层浅埋小净距非对称断面隧道施工方案优化

宋战平^{1,2}, 王双院¹, 苏春生^{2,3}, 潘红伟⁴, 卫守峰³

(1. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 陕西省岩土与地下空间工程重点实验室(西安建筑科技大学), 陕西 西安 710055;
3. 中国铁建大桥工程局集团有限公司 天津 300300; 4. 中铁北京工程局集团第一工程有限公司, 陕西 西安 710100)

摘要: 在黄土地层中进行浅埋非对称小净距地铁隧道施工时极易引起围岩变形和沉降过大等工程问题。为优化该特殊地质条件下隧道的施工方法, 本文以西安地铁四号线雁南四路站——大唐芙蓉园站存车区间小净距隧道为工程背景, 对右隧先行和左隧先行两种开挖方式进行了数值分析。结果显示两种开挖方式完成后地表沉降稳定值为 23.5 mm、23.9 mm, 右隧拱顶沉降稳定值为 31.5 mm、31.7 mm, 左隧拱顶沉降稳定值为 22.0 mm、22.3 mm, 几乎没有差别。右隧先行时 1# 导洞至 4# 导洞最大水平收敛值是左隧先行的 0.80 倍、0.86 倍、0.79 倍、0.90 倍; 左隧最大水平收敛值是左隧先行的 0.54 倍, 这表明右隧先行能够有效的减小围岩水平收敛值。两种开挖方式下右隧围岩最大主应力为 0.22 MPa、0.25 MPa, 左隧围岩最大主应力为 0.19 MPa、0.16 MPa, 差别很小, 两种开挖方式开挖完成后塑性区分布相似。最后对比模拟结果与监测数据发现数值差异较小且具有相同的规律性。该工法已成功应用于西安地铁 4 号线存车区间隧道, 可为后续非对称小净距隧道施工提供参考和借鉴。

关键词: 隧道工程; 非对称断面; 小净距隧道; 数值模拟; 施工方案

中图分类号: U455.6

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2022)05-0646-11

Optimization of construction scheme for shallow buried tunnel with small spacing asymmetric section in loess stratum

SONG Zhanping^{1,2}, WANG Shuangyuan¹, SU Chunsheng^{2,3}, PAN Hongwei⁴, WEI Shoufeng³

(1. School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

2. Shaanxi Key Laboratory of Geotechnical and Underground Space Engineering(XAUAT), Xi'an 710055, China;

3. China Railway Construction Bridge Engineering Bureau Group Co., Ltd., Tianjin 300300, China;

4. China Railway Beijing Engineering Bureau Group First Engineering Co., Ltd., Xi'an 710100, China)

Abstract: It is easy to cause the deformation and settlement of surrounding rock during the construction of shallow underground tunnel with asymmetric small spacing in loess stratum. In order to optimize the tunnel construction method under the special geological condition, this paper takes the small spacing tunnel between Yannan Fourth Road Station and Datang Furongyuan Station of Xi'an Metro Line 4 as the engineering background, and carries out numerical analysis on the two excavation methods of right tunnel first and left tunnel first. The results show that the stable settlement values of the ground surface after the completion of the two excavation methods are 23.5 mm and 23.9 mm respectively, the stable settlement values of the right tunnel vault are 31.5 mm and 31.7 mm, and the stable settlement values of the left tunnel vault are 22.0 mm and 22.3 mm, with almost no difference. The horizontal convergence values of 1# hole to 4# hole are 0.80 times, 0.86 times, 0.79 times and 0.90 times higher than that of the left tunnel first. The maximum horizontal convergence value of the right tunnel is 0.54 times that of the left tunnel first, which indicates that the right tunnel first can effectively reduce the horizontal convergence value. Under the two excavation methods, the maximum principal stress of the surrounding rock of the right tunnel is 0.22 MPa, 0.25 MPa, and the maximum principal stress of the surrounding rock of the left tunnel is 0.19 MPa, 0.16 MPa. The difference is very small, and the plastic zone distribution after the excavation according to the two

收稿日期: 2021-08-25

修改稿日期: 2022-10-08

基金项目: 陕西省创新能力支撑计划-创新团队(2020TD-005); 陕西省住房和城乡建设科技计划项目(No. 2019-K39)

第一作者: 宋战平(1974—), 男, 博士生导师, 主要从事岩土工程、隧道与地下工程方面的教学与研究工作。E-mail: songzhpyt@xauat.edu.cn

excavation methods is similar. Finally, comparing the simulation results with the monitoring data, it is found that the numerical difference is small and has the same regularity. This method has been successfully applied to the car-storage interval tunnel of Xi'an Metro Line 4, which can provide reference for the subsequent construction of asymmetric small spacing tunnel.

Key words: tunnel engineering; asymmetrical section; small spacing tunnel; numerical simulation; construction plan

近年来我国西北城市经济迅速发展,为满足人们日益增长的出行需求和有效缓解出行压力,修建地铁隧道成为城市交通发展的重要内容。由于城市地下建筑物和结构较多,隧道的建设受到占地空间、邻近建筑物的影响,这给隧道的建设带来了困难,而小净距隧道中岩柱的厚度比普通双洞要小,造价比连拱隧道低的优势使其在越来越多的工程中得到应用^[1-3]。受地质条件和隧道特点影响,在黄土地层修建浅埋小净距大跨度隧道的难度较大,这对于黄土地区隧道施工提出了更高的要求,所以选取合理的施工方法具有重要意义。

国内外众多学者针对小净距隧道展开了研究:余顺等^[4]通过建立二维模型,分析隧道开挖、初期支护及二次衬砌等关键施工过程,研究了浅埋小净距隧道下穿地表时对建筑物的变形影响。宋战平等^[5-7]等通过理论与现场监测,提出了“底部双导洞超前施工”的新工法并分析了小净距隧道各施工工序相互间的影响。霍润科等^[8-10]研究了软弱围岩下小间距地表沉降控制规律,提出了采用深孔注浆加固技术和顶升技术以减少车站底板沉降。田志宇等^[11]从静力学、动力学两个方面对小净距隧道中夹岩的破坏模式进行了研究,得出了小净距隧道中夹岩的破坏始于靠先行洞一侧拱腰位置的结论。龚建伍等^[12]研究了浅埋小净距隧道围岩压力分布的偏压特征,得到了隧道内侧垂直压力大于外侧,内侧侧压力小于外侧的结论。Ng等^[13-14]建立三维模型对双线平行小净距隧道进行研究得出了隧道中岩柱土体的荷载变化规律,总结了当改变两隧道之间掌子面距离时对中岩柱的稳定性影响。李建林等^[15-16]利用有限元软件模拟分析了采用台阶法、CD法及CRD法开挖Ⅳ级围岩小净距段的施工过程,获得了不同施工方法下围岩和支护结构的变形及力学特性。Chu等^[17-18]通过建立二维的平面应变数值模型对比不同介质下小净距隧道开挖时围岩的应力分布特征。Wang等^[19-21]研究了小净距隧道引起的地表变形,建立了地表沉降计算模型。

根据以上文献回顾,对于小净距隧道的不同的工法施工对比及围岩应力的研究较多,但是,

关于黄土地区非对称小净距浅埋大跨度地铁隧道的先行隧道对施工的影响研究甚少。本文依托西安地铁四号线雁南四路站——大唐芙蓉园站存车区间工程,通过有限元模拟,探讨非对称小净距浅埋大跨度地铁隧道在不同的先行隧道下地表沉降、拱顶沉降、水平收敛、围岩应力、塑性区的规律,最后通过实际监测验证其合理性,为同类工程施工提供经验参考。

1 工程概况

西安地铁四号线雁南四路站——大唐芙蓉园站区间主要沿西安市雁塔区芙蓉西路地下布置,起止里程为CK8+371.825~CK9+619.325,全长1 247.5 m,采用浅埋暗挖法施工。在大唐芙蓉园南端有单存车线,存车线区间的起止里程为CK9+358.100~CK9+619.325,紧邻大唐芙蓉园车站处地铁左右线存在246 m的小净距施工问题。隧道左隧尺寸为6.4×6.7 m,右隧断面尺寸为12.2×10.0 m,整个隧道区间拱顶埋深最深处22.1 m,右隧左隧净距4.1 m,属于典型的浅埋非对称小净距隧道。

现场地质条件从上到下依次为1.5 m的杂填土、10.6 m的新黄土、老黄土。在隧道开挖中,右隧共划分为6个导洞,采用双侧壁导坑法施工以控制地表沉降和围岩变形,左隧采用上下台阶法施工。隧道导洞划分及支护结构如图1所示。

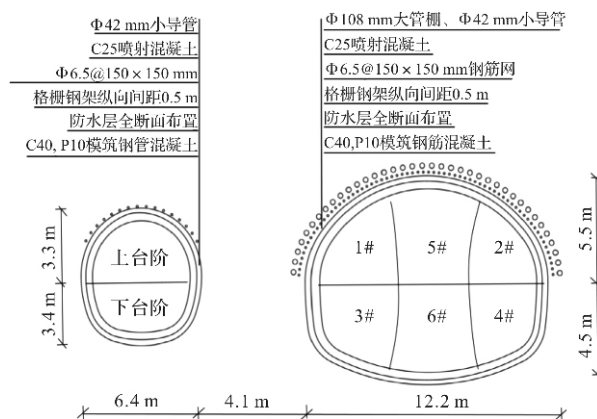


图1 隧道横断面图

Fig. 1 Tunnel cross section

由于隧道开挖地层为老黄土，土质疏松、强度较低、变形量大等特点加剧了施工难度。所以研究非对称小净距浅埋大跨度隧道的先行隧道对于控制地表沉降与围岩变形具有重要意义。

2 数值模型构建及分析方案

2.1 数值模型构建

为了研究隧道在不同的先行隧道下地表沉降、拱顶沉降、水平收敛、围岩应力、塑性区规律，采用 MIDAS/GTS 软件对隧道施工进行数值模拟。依据弹性力学和岩石力学相关知识^[22]可知，隧道开挖对围岩应力状态的影响区域为隧道开挖轮廓线外 3 倍隧道宽度，即 X 方向距离取 $3D$ ， Y 轴方向距离取 $1.5(H+3D)$ ， Z 轴方向右隧底部到下边界的距离为 $3D$ 。其中 D 为导洞宽度， H 为隧道埋深，根据实际情况 X 、 Y 、 Z 轴方向分别取为 105 m 、 120 m 、 60 m 。有限元模型网格划分如图 2 所示。

在静力状态下进行模拟时，只需考虑在自重条件下隧道开挖对岩土体及支护结构的影响，不考虑构造应力及地下水的作用，模型的四周边界设置为水平约束，底面边界设置为水平和竖直约束。为消除模型边界对数值模拟结果的影响且保证结果的代表性，选取距起始开挖面 78 m 处 CK9+530 截面作为特征面。

表 1 材料物理力学参数

Tab. 1 Physical and mechanical parameters of materials

材料名称	重度/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量/kPa	泊松比/ μ	内摩擦角/($^{\circ}$)	粘聚力/kPa	厚度/m
杂填土	18.00	2.00×10^3	0.25	1.00	5.00	1.50
新黄土	18.50	5.00×10^4	0.30	22.50	25.00	10.60
老黄土	19.60	1.60×10^5	0.30	22.50	32.00	40.00
大管棚	25.00	5.00×10^7	0.30	/	/	/
小导管	23.00	3.00×10^7	0.30	/	/	/
初期支护	23.00	2.10×10^7	0.20	/	/	0.30
中隔墙/板	25.00	2.70×10^7	0.20	/	/	0.50
右隧加固区	22.00	12.00×10^5	0.30	20.00	30.00	0.80
左隧加固区	22.00	4.60×10^5	0.30	20.00	30.00	0.50

2.3 数值模拟方案

为了探究右隧先行和左隧先行两种施工方案引起的地表沉降、拱顶沉降、水平收敛、围岩应力、塑性区变化规律，通过方案 1 和方案 2 进行数值模拟分析。

方案 1：先开挖右隧，在右隧开挖 30 m 后开挖左隧，按照 1# 导洞、2# 导洞—3# 导洞、4# 导洞—5# 导洞—6# 导洞—上台阶—下台阶顺序开挖模拟。

方案 2：先开挖左隧，在左隧开挖 30 m 后开

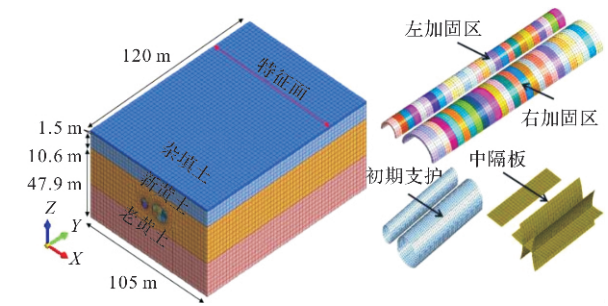


图 2 模型整体图

Fig. 2 Overall model diagram

2.2 数值模型参数确定

假定地表和各土层均质且水平层状分布，岩土体采用 Mohr-Coulomb 本构模型，初期支护结构和临时支护中隔板假定为变形弹性板单元。具体材料参数和勘察材料详见表 1。按照刚度等效方法^[23]，利用式(1)将大管棚、小导管注浆后的弹性模量折算给老黄土对超前支护进行等效计算。折算后的右隧与左隧加固区参数如下表 1 所示。

$$E_c = E_0 + \frac{A_s E_s}{A_c} \quad (1)$$

式中： E_c 为加固区弹性模量； E_0 为原老黄土弹性模量； A_s 为大管棚和小导管注浆区面积； E_s 为浆液弹性模量； A_c 为加固区面积。

挖右隧，按照上台阶—下台阶—1# 导洞、2# 导洞—3# 导洞、4# 导洞—5# 导洞—6# 导洞顺序开挖模拟。

如图 3 所示，考虑到初期支护应及时封闭成环且开挖循环进尺为 3 m ，假定右隧各导洞、左隧各导洞开挖间隔距离均为 6 m 。在两施工方案的模拟过程中，初期支护结构滞后一个模拟步施作。由于二衬是在隧道断面稳定后再行施加的，距离开挖掌子面较远，所以三维模型计算过程中不考虑二衬。

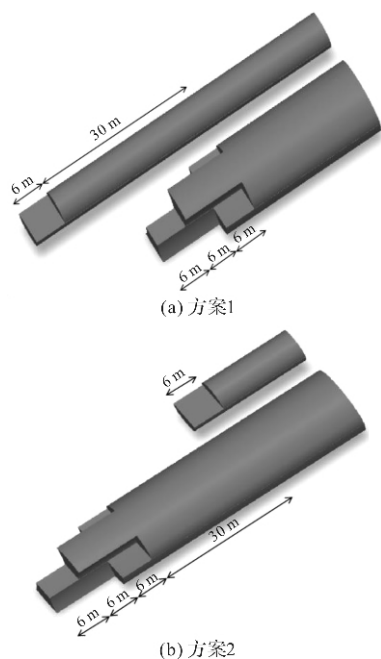


图3 隧道开挖间隔距离

Fig. 3 Distance between tunnel excavation

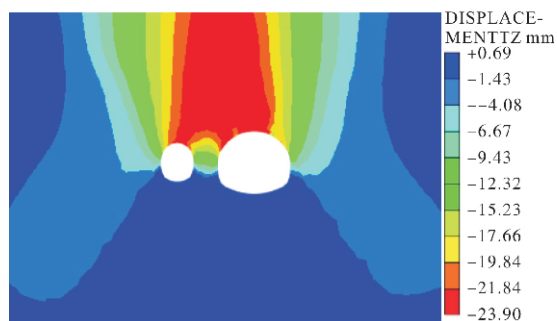
3 开挖顺序数值分析

3.1 地表沉降

图4是开挖完成后特征面地表沉降云图,由图4可知,两种开挖方式下特征面沉降云图分布规律相似,由于右隧先行时造成的偏压作用明显大于左隧先行,右隧先行下地表沉降值影响范围大于左隧先行。



(a) 方案1

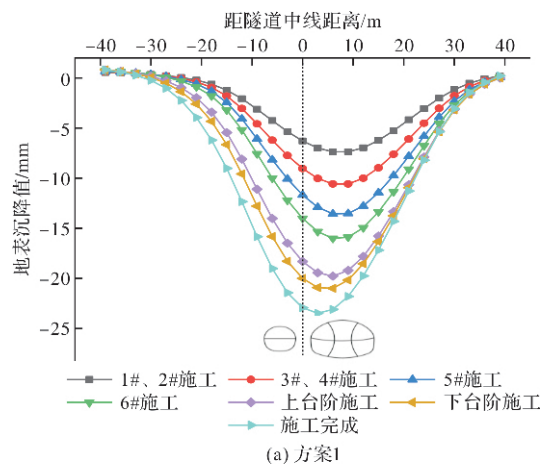


(b) 方案2

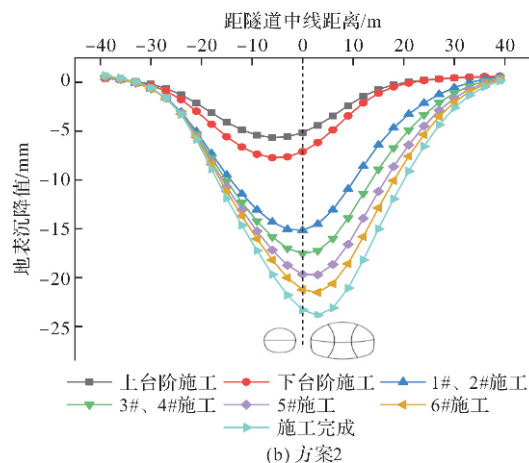
图4 开挖完成后特征面沉降云图

Fig. 4 Cloud diagram of characteristic surface settlement after excavation

两种施工方案开挖过程中特征面地表沉降曲线如图5所示,由图5可知,由于两隧道非对称,隧道的开挖引起地表沉降的叠加,两种方案的地表沉降均表现为“单峰”状态。随着各导洞的开挖,地表沉降值不断增加,施工完成后方案1峰值左侧的最终地表沉降值小于方案2,方案2峰值右侧的最终地表沉降值小于方案1。



(a) 方案1



(b) 方案2

图5 特征面地表沉降曲线

Fig. 5 Surface settlement curve of characteristic surface

由图5(a)可知,方案1中右隧开挖始末地表沉降峰值点一直位于中岩柱中轴线右侧6m处,随着右隧各导洞依次经过特征面,地表沉降值不断增加,当左隧开挖后,峰值受左隧开挖的影响,所处位置从中岩柱中轴线右侧6m处变化至中轴线右侧3m处,这表明左隧开挖会对地表沉降峰值点造成一定的影响。右隧6#导洞开挖至左隧上台阶段期间,地表沉降量达到最大增量4.3mm。由图5(b)可知,方案2中地表沉降峰值点首先位于中岩柱中轴线左侧6m处,由于右隧开挖的影响,峰值点由中岩柱中轴线左侧6m处变化至右侧3m处,这表明地表沉降峰值点受右隧开挖影响较大。左隧下台阶开挖至右隧1#导洞、2#导洞期间,地表沉降量达到最大增量8.4mm。

两种施工方案开挖完成后地表沉降峰值为 23.5 mm、23.9 mm, 地表沉降峰值点都位于中岩柱中轴线右侧 3 m 处, 这说明方案 1 与方案 2 对于地表沉降峰值及峰值所处位置影响不大。

3.2 拱顶沉降

图 6 是特征面在两种方案开挖过程中右隧、左隧拱顶沉降变化图。由图 6(a)可知, 对于右隧拱顶沉降, 两种施工方案下特征面导洞未开挖之前右隧拱顶沉降值占总沉降值的 13.1%、3.9%。由于方案 2 中左隧的开挖造成围岩的应力释放, 1#导洞至 6#导洞的开挖对最终拱顶沉降值的影响大于方案 1, 特征面 1#导洞至 6#导洞开挖后拱顶沉降增加值占总沉降值的 73.9%、86.8%。上台阶、下台阶开挖后拱顶沉降增加值占总沉降值的 9.5%、1.9%。这表明右隧拱顶沉降主要受右隧各导洞的开挖影响。方案 1 和方案 2 开挖完成后沉降值为 31.5 mm、31.7 mm, 这表明两种施工方案对右隧拱顶最终沉降值影响不大。

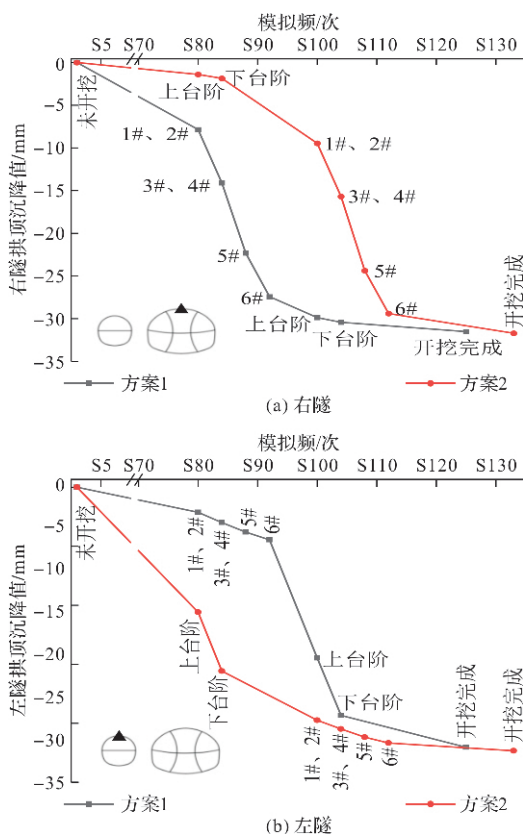


图 6 拱顶沉降曲线

Fig. 6 Vault settlement curve

由图 6(b)可知, 对于左隧拱顶沉降, 两种施工方案下特征面导洞未开挖之前, 左隧拱顶沉降值占总沉降值的 8.4%、16.9%, 特征面 1#导洞—6#导洞开挖后拱顶沉降增加值占总沉降值的

11.8%、27.3%, 上台阶、下台阶开挖后拱顶沉降增加值占总沉降值的 67.5%、52.8%, 这表明两种施工方案下左隧拱顶沉降值主要受上、下台阶的影响。由于右隧断面大, 右隧各导洞的开挖对左隧拱顶沉降有一定影响, 但拱顶沉降主要是由左隧开挖造成。方案 1 和方案 2 开挖完成后沉降值为 22.0 mm、22.3 mm, 这表明两种施工方案对左隧拱顶最终沉降值影响不大。

3.3 水平收敛

图 7、图 8 是特征面在方案 1 和方案 2 开挖过程中 1#导洞至 4#导洞、左隧水平收敛值变化图, 由图 7(a)、7(b)可知, 1#导洞、2#导洞水平收敛值都呈现先增加后减小最后趋于稳定的趋势。1#导洞、2#导洞的水平收敛值随着其导洞的开挖迅速增加, 由于左隧的开挖会造成应力释放, 方案 2 中 1#导洞、2#导洞开挖后水平收敛值增加量为 20.9 mm、14.7 mm, 明显大于方案 1 中水平收敛值增加量 15.7 mm、12.2 mm, 3#导洞、4#导洞开挖后水平收敛值达到最大, 1#导洞最大水平收敛值为 23.6 mm、29.5 mm, 2#导洞最大水平收敛值为 20.2 mm、23.5 mm, 随着右隧剩余导洞的开挖, 1#导洞右侧、2#导洞左侧出现临空面, 其水平收敛值减少。上、下台阶的开挖对 1#导洞、2#导洞的水平收敛值影响不大, 但由于 1#导洞受左隧开挖的影响更明显, 1#导洞水平收敛值明显大于 2#导洞水平收敛值。开挖完成后 1#导洞水平收敛稳定值为 17.8 mm、23.6 mm, 2#导洞水平收敛稳定值为 14.2 mm、17.6 mm, 这表明方案 1 控制 1#导洞、2#导洞的水平收敛值效果明显优于方案 2。

由图 7(c)、图 7(d)可知, 3#导洞、4#导洞水平收敛值受左隧及 1#导洞、2#导洞的开挖影响不大, 两种开挖方式下 3#导洞、4#导洞开挖后达到最大增量, 方案 2 中最大增量为 29.6 mm、22.8 mm, 大于方案 1 的最大增量 24.06 mm、20.2 mm, 5#导洞开挖后 3#导洞、4#导洞水平收敛值达到峰值 36.6 mm、29.3 mm, 6#导洞开挖后, 由于 3#导洞右侧、4#导洞左侧出现新的临空面, 其水平收敛值减小。方案 1 和方案 2 开挖完成后 3#导洞水平收敛稳定值为 22.6 mm、30.5 mm, 4#导洞水平收敛稳定值为 21.2 mm、23.8 mm。这表明方案 1 控制 3#导洞、4#导洞的水平收敛值效果明显优于方案 2。

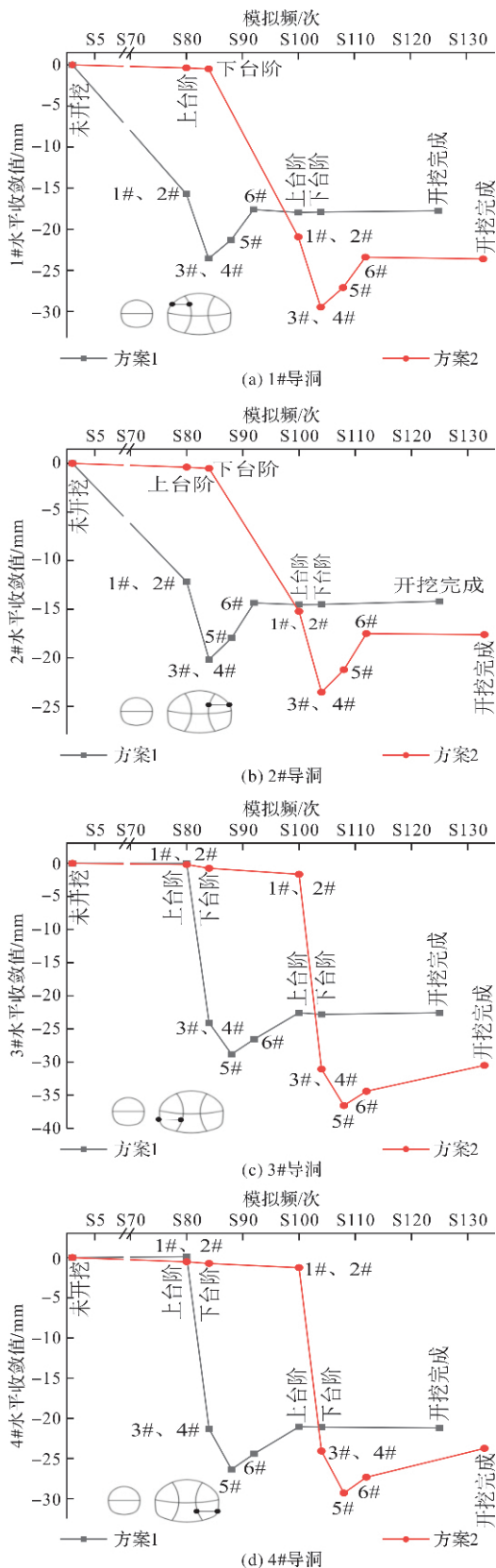


图7 1#导洞-4#导洞水平收敛曲线

Fig. 7 Horizontal convergence curve of 1# hole to 4# hole

由图8可知,方案1特征面右隧各导洞的开挖对左隧水平收敛值影响较大,这是由于右隧断面面积是左隧的2倍左右,右隧开挖造成的应力释放对左隧影响较大。左隧水平收敛值随着右侧临空

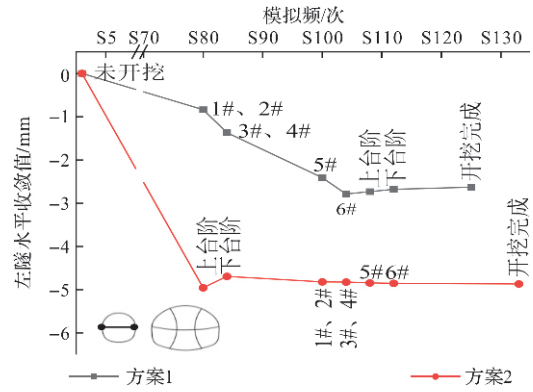


图8 左隧水平收敛曲线

Fig. 8 Horizontal convergence curve of the left tunnel

面不断增加而变大,水平收敛最大值和稳定值为2.8 mm、2.6 mm,方案2上台阶开挖后水平收敛达到最大值5.0 mm,之后稳定在4.9 mm。这表明方案2中左隧下台阶及右隧开挖前左隧拱腰变形已基本完成且方案1控制左隧水平收敛值比方案2具有明显优势。

3.4 围岩应力

图9是围岩应力取值点的分布图,在隧道周围选取应力取值点研究最大主应力值在两种施工方案下各个阶段的变化规律。

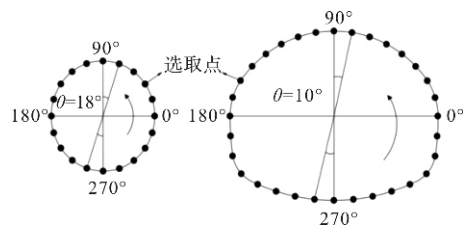


图9 围岩应力变化取值点位置图

Fig. 9 Location of the stress change value point of surrounding rock

图10是隧道围岩各个阶段的最大主应力分布图,由图10(a)、10(b)可知,由于右隧上方围岩自重影响,右隧上部围岩最大主应力大于下部,围岩上部最大主应力由压应力逐渐转化为拉应力,下部在开挖过程中均为压应力。右隧各导洞在其导洞开挖时最大应力值明显增加,随着右隧剩余导洞的开挖,最大主应力值不断增加,由图10(a)可知,方案1中6#导洞开挖后最大应力值趋于稳定,受左隧开挖影响很小。由图10(b)可知,方案2左隧上下台阶开挖对于右隧最大主应力影响很小,这表明右隧最大主应力主要受右隧开挖的影响。方案1、方案2开挖过程中右隧最大主应力值是0.22 MPa、0.25 MPa(拉应力),这表明右隧最大主应力值受两种施工方案影响不大。

对于左隧,由图10(c)、10(d)知,左隧最大主应力值主要受左隧开挖的影响,受右隧开挖影

响较小,其余规律与右隧相同.开挖过程中方案1、方案2最大主应力值为0.19 MPa、0.16 MPa

(拉应力).这表明左隧最大应力值受两种开挖方式影响不大.

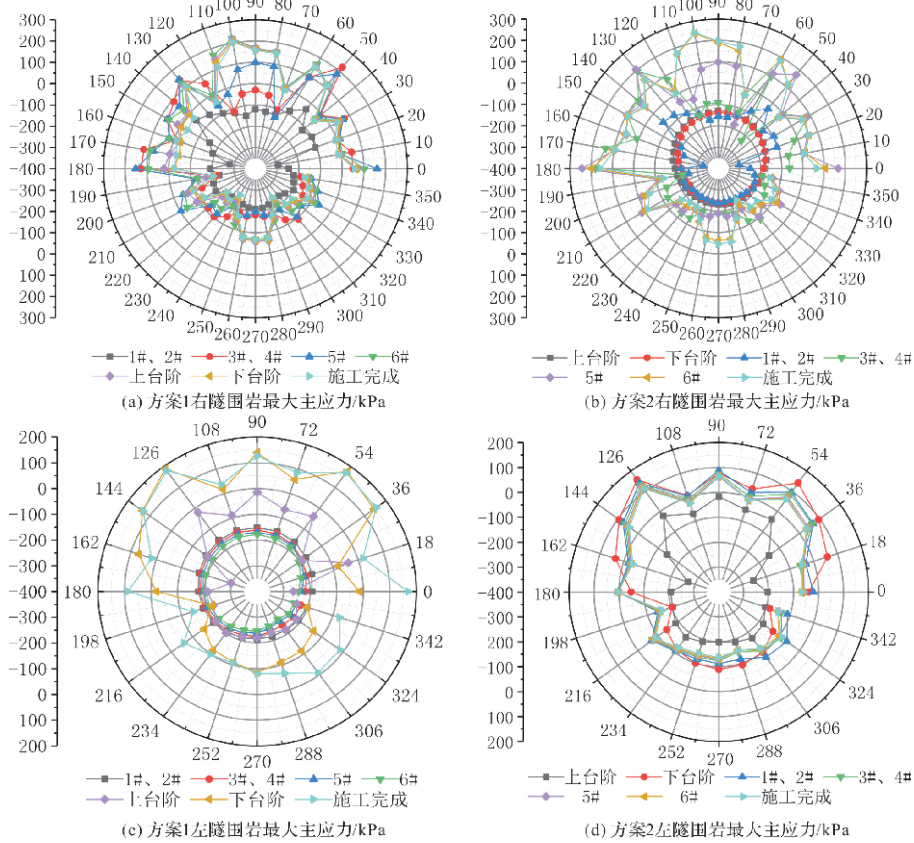


图10 隧道围岩各阶段应力分布图

Fig. 10 Stress distribution of tunnel surrounding rock in each stage

3.5 塑性区

图11、图12是方案1和方案2特征面各导洞开挖时塑性区变化图.由两图可知,在两种施工方式下,由于大管棚和小导管的超前支护作用,右隧顶部围岩没有出现塑性区,塑性区主要分布于相邻的未开挖导洞,而拱腰及拱脚处围岩由于没有加固,当开挖至隧道下部导洞时拱腰及拱脚

处出现塑性区.左隧由于仅有小导管加固,上台阶开挖后加固区及下台阶出现了塑性区.当特征面各导洞开挖完成后,左隧先行和右隧先行两种方式整体塑性区分布几乎无差别,中夹岩柱下部塑性区即将出现“连通”现象,在施工时应尤为注意,且从塑性区的角度证明此时隧道的净距是合理的.

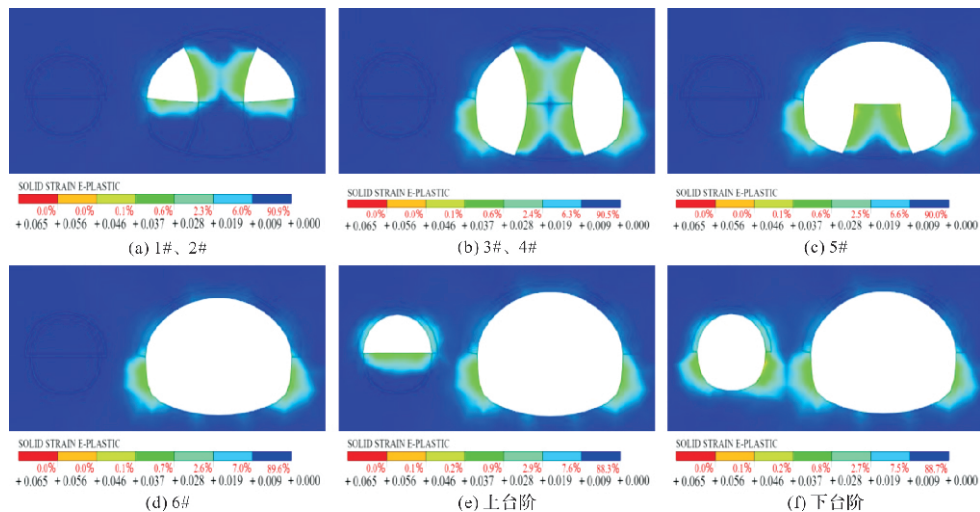


图11 方案1各阶段塑性区分布图

Fig. 11 Layout diagram of plastic zone at each stage of scheme 1

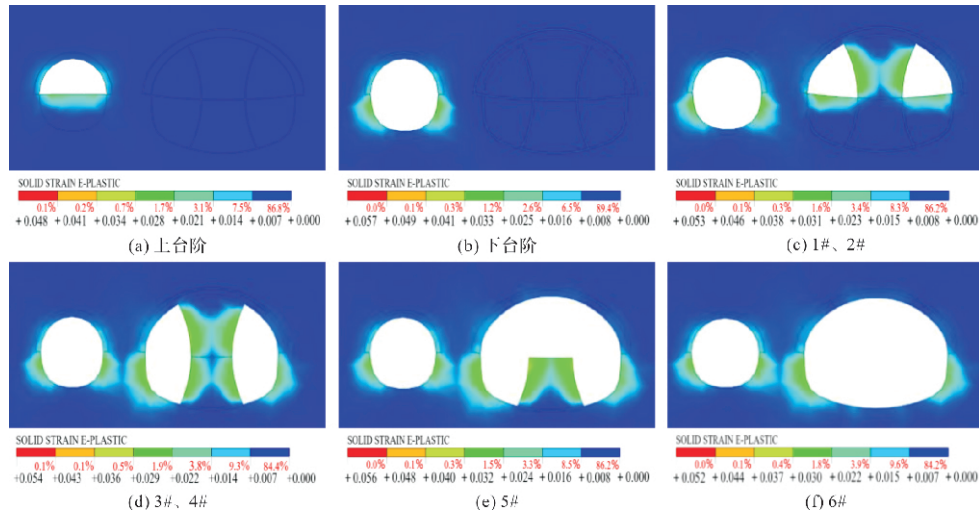


图 12 方案 2 各阶段塑性区分布图

Fig. 12 Layout diagram of plastic zone at each stage of scheme 2

3.6 基于数值模拟分析的开挖方式建议

综合以上分析,两种施工方案最终的地表沉降值、拱顶沉降值、塑性区分布没有明显差别,但方案 1 中 1# 导洞至 4# 导洞、左隧的最大水平收敛值明显小于方案 2。这是由于方案 2 中先行隧道受到二次扰动的次数明显大于方案 1。两隧道最大围岩应力受两种施工方案影响不大。因此,为控制围岩变形和保证施工安全,经过比选,建议实际施工采用方案 1。

4 施工监测

本工程在实际施工中采用方案 1,为确保施工安全,施工过程中对地表沉降、右隧及左隧的拱顶沉降、水平收敛进行了跟踪监测。待监测点变形稳定后将数值模拟结果与现场监测数据进行对比分析。监测点布置如图 13 所示。选取 CK9+530 断面监测数据与数值模拟结果进行对比分析。

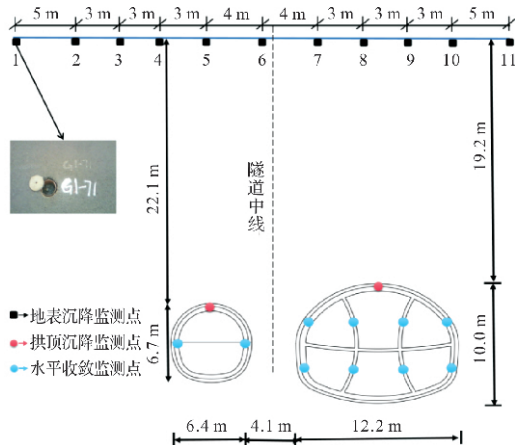


图 13 地表沉降及拱顶沉降监测点图

Fig. 13 Monitoring point map of surface settlement and vault settlement

由图 14 可知,地表沉降最大值点在数值模拟结果与现场监测数据中位于中岩柱中轴线右侧 3~6 m 范围内,这表明数值模拟结果与现场监测数据虽然有一定误差但不影响变化规律。由图 15、图 18 可知,拱顶沉降、左隧水平收敛的数值模拟结果和实际监测数据变化规律相同且都先增大后稳定。

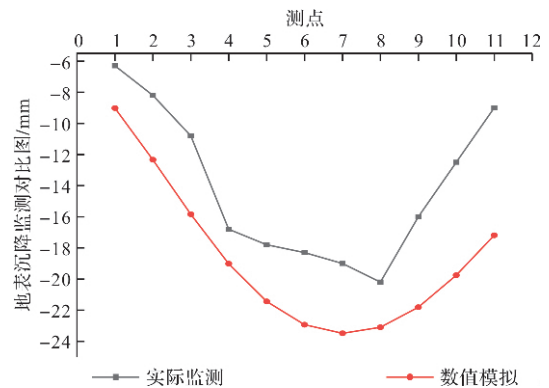


图 14 地表最终沉降对比

Fig. 14 Comparison of final surface settlement

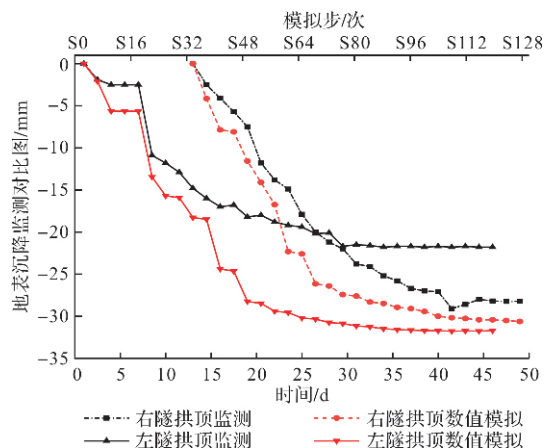


图 15 拱顶沉降对比

Fig. 15 Comparison of vault settlement

由图 16、图 17 可知,数值模拟结果与现场监测数据均显示 1# 导洞至 4# 导洞的水平收敛值存在减小情况,这是由于方案 1 左隧开挖至特征面时会在右隧左侧形成临空面造成应力再次释放,右隧收敛值先减少后趋于稳定。

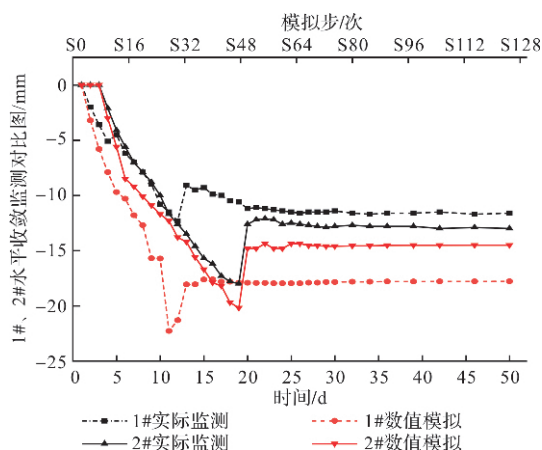


图 16 1#、2# 水平收敛对比

Fig. 16 Horizontal convergence comparison of 1#, 2#

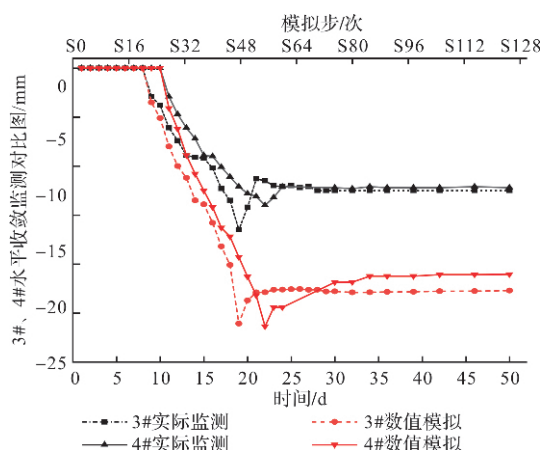


图 17 3#、4# 水平收敛对比

Fig. 17 Horizontal convergence comparison of 3#, 4#

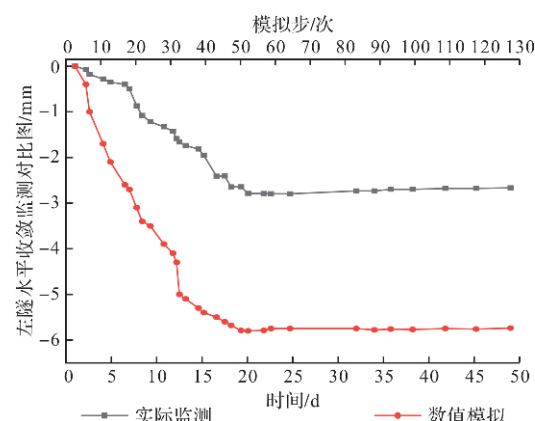


图 18 左隧水平收敛对比

Fig. 18 Horizontal convergence comparison of the left tunnel

由图 14~图 18 可知,数值模拟结果均大于实

际监测数据,这是由于在数值模拟过程中对实际情况进行简化,且实际监测之前围岩已经有了部分变形.数值模拟结果与现场实际监测数据规律相同,这表明数值模拟能为现场施工提供借鉴和参考,而且数值模拟结果得到的曲线更光滑,这说明数值模拟较理想化而现场实际情况更加复杂,在实际施工时应该加强监测。

综上,为控制地表沉降及围岩变形,通过分析数值模拟结果,建议在施工中采用方案 1. 然后对比数值模拟结果与现场监测数据证明选用方案 1 是合理的。

5 结论

以西安地铁 4 号线存车线区间非对称浅埋大跨度小净距隧道为工程背景,通过数值分析研究在不同先行隧道下各阶段地表沉降、拱顶沉降、水平收敛、围岩应力、塑性区的规律.然后通过数值模拟结果与现场监测数据的对比分析,验证数值模拟的合理性.最终得出结论如下。

(1)右隧先行和左隧先行开挖完成后地表沉降最大值相差 0.4 mm 且沉降峰值处于同一位置,右隧、左隧在两种方案下拱顶最大沉降值差值为 0.2 mm、0.3 mm,围岩最大主应力均相差 0.03 MPa,塑性区分布差别很小.这表明右隧先行和左隧先行对于地表沉降值、拱顶沉降值、围岩最大主应力影响差别不大;

(2)右隧先行时 1# 导洞至 4# 导洞的最大水平收敛值分别是左隧先行的 0.80 倍、0.86 倍、0.79 倍、0.90 倍;左隧最大水平收敛值是左隧先行的 0.54 倍,差异明显.所以综合考虑建议施工采用右隧先行;

(3)数值模拟结果与现场监测数据具有相同的规律性,由于模型简化及监测不及时,数值具有一定的差异性,但不影响规律的可靠性.这表明数值模拟结果能为现场施工提供参考和建议。

参考文献 References

- [1] 赵迎,霍奇,宋战平,等.大跨暗挖车站叠合初支拱盖法施工适应性研究[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2019,51(5):688-694.
ZHAO Ying, HUO Qi, SONG Zhanping, et al. Study on adaptability of overlapping primary support arch

- cover method for large-span embedded station[J]. J. of Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2019, 51(5):688-694.
- [2] 赵笑鹏. 饱和软土地层管幕暗挖法施工风险及对策研究[J]. 隧道建设, 2020, 40(10): 1533-1539.
ZHAO Xiaopeng. Research on construction risks and countermeasures of pipe roof undercutting method in saturated soft soil [J]. Tunnel Construction, 2020, 40 (10): 1533-1539.
- [3] 卫守峰. 黄土地区地铁竖井转横通暗挖施工稳定性分析[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2020, 52(3): 366-375.
WEI Shoufeng. Optimization analysis of tunnel construction methods through cross aisle from subway shaft based on numerical test analysis in loess stratum [J]. J. of Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2020, 52(3): 366-375.
- [4] 余顺, 江星宏, 王道良. 浅埋小净距隧道下穿地表建筑物变形影响分析[J]. 现代隧道技术, 2019, 56 (S2): 254-262.
YU Shun, JIANG Xinghong, WANG Daoliang. Analysis of deformation influence of shallow buried small clear distance tunnel passing through surface buildings [J]. Modern Tunnelling Technology, 2019, 56 (S2): 254-262.
- [5] 宋战平, 张强, 赵克明, 等. 基于现场监测及数值分析的隧道双导洞超前施工优化研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2018, 50(5):654-661.
SONG Zhanping, ZHANG Qiang, ZHAO Keming, et al. Optimization study of advanced double-drift tunnel construction based on on-site monitoring and numerical analysis[J]. J. of Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2018, 50(5): 654-661.
- [6] SONG Zhanping, SHI Guilin, ZHAO Keming, et al. Study of the stability of tunnel construction based on double-heading advance construction method[J]. Advances in Mechanical Engineering. 2020, 12(1): 1-17.
- [7] SONG Zhanping, CAO Zuilin, WANG Junbao, et al. Optimal analysis of tunnel construction methods through cross passage from subway shaft [J]. Advances in Civil Engineering, 2018, 2018(3): 1-14.
- [8] HUO Runke, ZHOU Pengyuan, SONG Zhanping, et. al. Study on the settlement of large-span metro station's baseplate caused by the tunnels newly built beneath it [J]. Advances in Mechanical Engineering, 2019, 11 (2): 1-13.
- [9] 李浩, 刘毅, 彭振, 等. 边坡偏压对于邻近地铁车站基坑稳定性影响分析[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2020, 52(3): 359-365.
LI Hao, LIU Yi, PENG zhen, et. al. Analysis on the influence of slope bias on the stability of foundation pit of adjacent subway station. [J]. J. of Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2020, 52 (3): 359-365.
- [10] ZHAO Ming, CHENG Yun, SONG Zhanping, et al. Stability analysis of TBM tunnel undercrossing existing high-speed railway tunnel: a case study from yangtaishan tunnel of shenzhen metro line 6 [J]. Advances in Civil Engineering, 2021, 2021(7): 1-18.
- [11] 田志宇, 林国进, 郑金龙, 等. 小净距隧道破坏模式研究[J]. 现代隧道技术, 2019, 56(S2): 202-208.
TIAN Zhiyu, LIN Guojin, ZHENG Jinlong, et. al. Study on failure mode of small clear distance tunnel [J]. Modern Tunnelling Technology, 2019, 56 (S2): 202-208.
- [12] 龚建伍, 夏才初, 雷学文. 浅埋小净距隧道围岩压力计算与监测分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29 (S2): 4139-4145.
GONG Jianwu, XIA Caichu, LEI Xuwen. Calculation and monitoring analysis of surrounding rock pressure of shallow buried tunnel with small clear distance[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29 (S2): 4139-4145.
- [13] NG C W W, LEE K M, TANG D K W. Three-dimensional numerical investigations of new Austrian tunneling method (NATM) twin tunnel interactions[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2004, 41(3): 523-539.
- [14] 李翔宇, 李新源, 李明宇, 等. 基于实测数据的地铁隧道长期沉降预测模型研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2021, 53(2): 186-193.
LI Xiangyu, LI Xinyuan, LI Mingyu, et al. Study on long-term settlement prediction model of subway tunnel based on measured data[J]. J. of Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2021, 53 (2): 186-193.
- [15] 李建林, 吴金刚, 毕强. 大跨度小净距公路隧道设计与施工方法研究[J]. 现代隧道技术, 2019, 56(5): 157-162, 227.
LI Jianlin, WU Jingang, BI Qiang. Study on design and construction method of long-span and small clear distance highway tunnel[J]. Modern Tunnelling Technology, 2019, 56(5): 157-162, 227.

- [16] 于介. 黄土塬区浅埋大断面隧道施工变形分析与控制技术[J]. 隧道建设, 2020, 40(12): 1709-1716.
YU Jie. Deformation analysis and control technology of shallow-buried large cross-section tunnel in loess plateau area[J]. Tunnel Construction, 2020, 40(12): 1709-1716.
- [17] CHU B L, HSU S C, CHANG Y L. et al. Mechanical behavior of a twin-tunnel in multilayered formations [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2007, 22(3): 351-362.
- [18] 王飞, 高明忠, 林文明, 等. 深埋穿越破碎带隧道衬砌变形规律研究[J]. 隧道建设, 2020, 40(S1): 232-240.
WANG Fei, GAO Mingzhong, LIN Wenming, et. al. Study on the deformation law of deep buried tunnel lining crossing fractured zone[J]. Tunnel Construction, 2020, 40(S1): 232-240.
- [19] WANG F F, BAI H R, LI J J. Analysis of surface subsidence rule of the shallow subway tunnel construction[J]. Advanced Materials Research, 2013, 671: 1081-1086.
- [20] 王海龙, 韦良文, 雷圣偲. 小净距公路隧道中岩柱对地表沉降变形规律研究[J]. 隧道建设, 2021, 41(S1): 216-222.
WANG Hailong, WEI Liangwen, LEI Shengsi. Law of ground settlement caused by middle rock pillar in highway tunnel with small clear distance [J]. Tunnel Construction, 2021, 41(S1): 216-222.
- [21] TIAN Xiaoxu, SONG Zhanping, WANG Bing, et al. A theoretical calculation method of influence radius of settlement based on slices method in tunnel construction [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2020, 2020(2): 1-9.
- [22] 徐芝纶. 弹性力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1982.
XU Zhilun. Elastic Mechanics[M]. Beijing: Higher Education Press, 1982.
- [23] SONG Z, CAO Z, WANG J, et al. Optimal analysis of tunnel construction methods through cross passage from subway shaft[J]. Advances in Civil Engineering, 2018, 2018(3): 1-14.

(编辑 桂智刚)