

城市地下通道交叉中隔墙法超前支护小导管的参数优化分析

李金奎^{1,2} 任 恒²

(1. 大连大学建筑工程学院, 116622, 大连; 2. 大连市隧道与地下工程中心, 116622, 大连//第一作者, 教授)

摘 要 目的:隧道开挖前的超前支护是采用交叉中隔墙法施工的关键一环,研究交叉中隔墙法超前支护的小导管在不同支护参数下施工对围岩产生的变形和应力影响,能根据现场实际更好地调整超前支护的效果。方法:以连接大连恒隆广场与大连地铁2号线人民广场站的地下通道为工程背景,将施工现场数据结合理论分析和 MIDAS GTS 有限元软件数值模拟试验;将地下通道开挖过程中产生的拱顶下沉、水平收敛、地面沉降作为分析指标,以小导管的外插角、导管长度、环向间距作为研究对象。对比分析多种小导管参数组合对围岩的支护效果,从中选取优化后的小导管参数进行数值模拟分析。结果及结论:现场监测的数据与数值模拟的结果拟合表明,超前支护效果主要与小导管的管长和外插角相关,通过调整小导管的长度和外墙角可以有效增强支护效果;环向间距对超前支护的效果不明显,应根据小导管的注浆半径来确认环形间距。通过对小导管参数的调整可以有效地提高对围岩的支护效力,保障地下人行通道的运营安全和施工效率。

关键词 城市轨道交通;地下通道;交叉中隔墙法;超前支护;数值模拟

中图分类号 U455.41⁺1

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.07.014

Optimization Analysis of Advance Support Small Pipe Parameters for Urban Underground Passage CRD Method Construction

LI Jinkui, REN Heng

Abstract Objective: The AS (advance support) before tunnel excavation is a key link in CRD (center cross diagram) method construction. The deformation and stress of surrounding rock under influence of different supporting parameters of CRD method AS small pipes are studied, to better enhance the AS effect according to the actual site conditions. Method: The underground passage connecting Dalian Henglong Plaza and Dalian Metro Line 2 People's Square Station is taken as engineering background, and the construction site data is combined with theoretical analysis and MIDAS GTS finite element soft-

ware numerical simulation test; the vault subsidence, horizontal convergence and land subsidence during underground passage excavation are taken as analysis indexes, and the external insertion angle, pipe length and circumferential distance of small pipes are studied. The support effect of various small pipe parameter combinations on surrounding rock is compared and analyzed. Optimized small pipe parameters are selected for numerical simulation. The fitting of field monitoring data and numerical simulation results show that the advance support effect is mainly related to the pipe length and external insertion angle of the small pipes, adjustment to the above factors can effectively enhance the support effect; as the effect of circumferential spacing on AS is not obvious, the circumferential spacing should be determined according to the grouting radius of small pipes. Result & Conclusion: By adjusting the parameters of the small pipes, the effectiveness of supporting surrounding rock can be evidently improved, ensuring the operation safety and construction efficiency of underground pedestrian passage.

Key words urban rail transit; underground passage; center cross diagram method; advance support; numerical calculation

First-author's address The Architecture and Engineering of Dalian University, 116622, Dalian, China

城市综合管廊、地下人行通道等地下工程,是城市公共基础设施的重要组成部分。对隧道采用暗挖法开挖可有效避免施工对城市的影响;超前支护作为暗挖法的重要环节,对消除地面和地层存在多种不确定因素影响有积极作用,且超前支护的支护效力决定着地下工程施工的进尺深度和开挖跨度^[1]。超前支护是保障隧道施工安全进行的重要措施。

目前,对隧道超前支护的研究有了丰富的成果。文献[2]采用高压水平旋喷桩技术达到加固围岩的目的;文献[3]通过对实测数据的计算,提出软

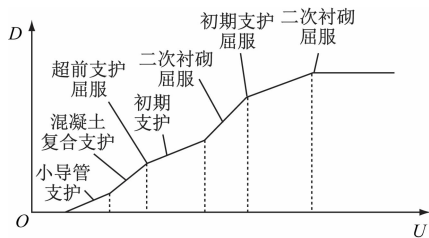
弱围岩隧道的2个判别指标;文献[4]通过数学和力学模型对掌子面的空间效应进行了 Hoek-Brown 算法拟合;文献[5]在超前管棚支护过程中采用锚杆进行加固处理,以控制掌子面的收敛变形;文献[6]通过模拟试验,发现拱顶位置形成了一个高度约为 $0.67M$ 的塌落区(M 为隧道最大跨度);文献[7]分析总结建立了塌方 SVM(支持向量机)算法预测模型。

现阶段,对超前支护效果的评价一般是参考山区和铁路隧道等相关规范,对城市地下通道的超前支护研究,在理论分析和定量分析上还缺少依据,对超前支护的理论计算、施工工艺和施工效果的评价也很少。因此,本文将以大连恒隆广场地下通道为实例,通过对超前小导管的环向间距、长度和外插角等影响因素调整,对比分析加固方案对围岩变形及破坏的影响,为城市地下通道的建设和超前支护提供理论依据,也为类似工程提供参考。

1 CRD(交叉中隔墙)法中超前支护小导管分析

1.1 超前加固机理分析

增加支护刚度主要分为2个阶段^[8-11]:①还未开挖前,对开挖土体进行超前支护,以增加土体的自稳能力;②随着隧道的开挖,围岩的压力不断增大,需在超前支护还未达到破坏屈服前,对已开挖的隧道进行初期支护。而此时的支护刚度可由超前支护和初期支护的支护刚度叠加,此时掌子面前方的应力释放减缓,结构变形也减轻。支护结构的受力特性曲线如图1所示。



注: U 为洞室变形; D 为支护对围岩的抗力。

图1 支护结构受力特性曲线

Fig. 1 Characteristic curve of stress on supporting structure

1.2 小导管主要参数设计

小导管的直径一般为 $30 \sim 50$ mm,管径太大会增大施工工具选择的难度,太小会降低小导管围岩的支撑能力和注浆的速率。其长度表达式为:

$$L = l + H \cot \varphi \quad (1)$$

式中:

L ——小导管长度;

l ——开挖长度;

φ ——摩擦角;

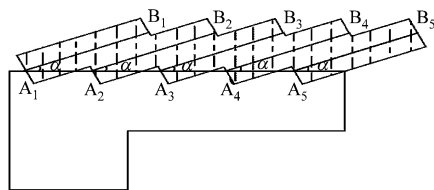
H ——围岩的塌落高度。

在施工中,超前支护小导管的内摩擦角一般小于 60° ,通过计算可知小导管的长度一般控制在 $2 \sim 5$ m 之间,过短的导管达不到要求的搭接长度,太长会导致导管受到来自围岩的弯矩过大。

根据理论计算和试验确定注浆半径 r 后,依据 r 和 L 确定小导管的外插角度 α :

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{r}{L}\right) \quad (2)$$

而环向布置范围一般沿掌子面外侧,以拱脚以上部位均匀布置,通常只要满足间距不超过导管的有效注浆半径,达到稳定围岩的效果即可^[12]。在小导管前部交叉钻设注浆孔,孔径为 $5 \sim 8$ mm。小导管注浆范围如图2所示。



注: A 为纵向超前支护小导管注浆管管口; B 为小导管终端。

图2 小导管注浆范围

Fig. 2 Small pipe grouting range

注浆管长度 K 可由式(3)计算:

$$K = [B^2 + (x + y)^2]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

式中:

x ——循环注浆进尺;

y ——注浆管水平搭接长度;

B ——注浆加固范围。

通过公式计算的 K 和 α 应同时满足 $y \geq 1$ m, $10^\circ < \alpha < 30^\circ$ 。加固区的范围根据式(2)和式(3)求得。但其对围岩影响范围和趋势并不清楚,因此采用单一变量的方式,模拟 CRD 法在一个开挖循环内(步距 3 m)小导管对围岩的支护效果。小导管模拟参数如表1所示。

2 工程概况

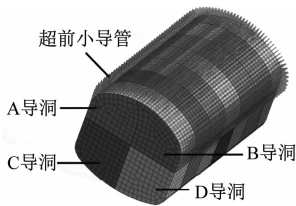
建筑场地位于大连市西岗区,起点为恒隆广场地下一层东北角,横穿五四路,下穿大同街至大连

表 1 小导管模拟参数

Tab. 1 Small pipe simulation parameters

项目	L/m	$\alpha/(^{\circ})$	环向间距/mm	加固区厚度/m
模拟 1	2.0	15	300	0.52
模拟 2	2.5	15	300	0.65
模拟 3	3.0	15	300	0.78
模拟 4	2.0	10	300	0.35
模拟 5	2.0	20	300	0.69
模拟 6	2.0	25	300	0.85
模拟 7	2.0	30	300	1.00
模拟 8	2.0	15	200	0.52
模拟 9	2.0	15	400	0.52
模拟 10	2.0	15	500	0.52

地铁 2 号线人民广场站;地下通道长约为 272 m,宽为 7.5~15.0 m,高约为 6.0~10.5 m,为单洞。连接通道顶板的标高约为 11.73~18.82 m,连接通道底板的标高约 1.92~13.32 m,通道顶板上部覆土厚约为 0.40~11.48 m 左右,衬砌为钢筋混凝土结构,地下通道拟采用暗挖法施工,其导洞开挖顺序如图 3 所示。



注:A、B、C、D 为导洞编号。

图 3 地下通道的导洞开挖示意图

Fig. 3 Diagram of under ground passage guide hole excavation

超前支护小导管一榀一打,水平搭接长度为 0.5 m。数值模拟计算所需的各力学参数如表 2 所示。

表 2 小导管及岩层的力学参数

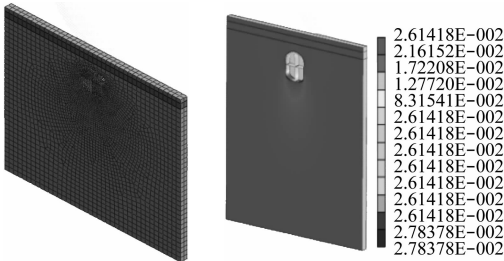
Tab. 2 Mechanical parameters of small pipes and rock stratum

岩层或结构名称	弹性模量/GPa	泊松比	重度/(kN/m ³)	黏聚力/kPa	内摩擦角/($^{\circ}$)
素填土	0.005	0.33	17.0	10	8
全风化板岩	0.200	0.31	16.4	35	28
中风化板岩	0.800	0.25	78.0	55	35
加固区	1.800	0.35	22.0	30	25
初期支护	10.000	0.28	25.0		
小导管	210.000	0.30	78.5		

3 数值模拟试验

3.1 单一变量有限元模型

根据圣维南原理,整个模型尺寸长为 80 m,宽为 3 m,高为 70 m,且由于地下通道的受力基本上对称。模型的边界条件为:左侧,右侧、前侧及后侧为水平约束,下部约束竖向位移,取上部位为自由边界。利用 MIDAS/GTS 有限元软件建立有限元模型如图 4 所示。模拟 CRD 法开挖过程,具体开挖阶段的施工工序为:S1 初始应力分析→S2 超前小导管支护→S3 开挖 A 导洞→S4 支护 A 导洞→S5 开挖 B 导洞→S6 支护 B 导洞→S7 开挖 C 导洞。



a) 有限元模型网格图 b) 有限元竖向位移云图

图 4 单一变量有限元模型图截图

Fig. 4 Screenshot of single variable finite element model diagram

3.2 单一变量数值模拟结果分析

根据模拟 1 至模拟 10 的分析结果,提取首次开挖掌子面顶部的节点、地面节点和两侧的水平节点,通过对比各组位移变化情况,分析超前支护小导管对围岩的稳定性影响。

3.2.1 管长对支护效果的影响分析

模拟 1、2、3 仅改变小导钢管长,由图 5 可知:随着导洞的依次开挖支护,在 S1—S2 阶段洞顶和地面的隆起随管长的变长而增大;在 S2—S7 阶段随地下通道断面的不断扩大,拱顶沉降、地面沉降、水平收敛的变化幅度也随之增大。通过计算,管长为 3 m 时比采用 2 m 时最终的地面沉降量增幅约 10.6%,对拱顶沉降的增幅约 5.6%,而水平收敛变化量小于 1%,可忽略不计;数据表明,2~3 m 范围内小导管的管长随长度的减小,对减少地面沉降和拱顶下沉具有明显的增加围岩稳定性的有利影响,而对于水平方向支护效果的影响并不明显。

3.2.2 外插角对支护效果的影响分析

表 1 中的模拟 1、4、5、6、7 分别为以小导管外插角为单一变量模型,通过图 6 可知:与图 5 一样,在小导管注浆阶段(S1—S2),随小导管注浆对地面和

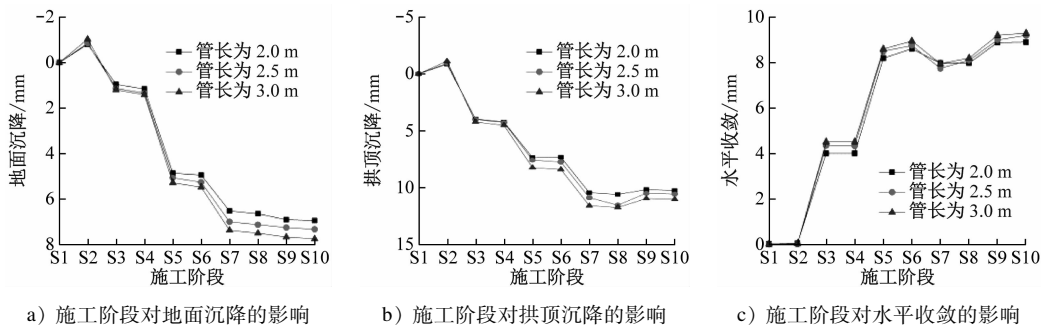


图 5 管长对围岩稳定性的影响

Fig. 5 Influence of conduit length on surrounding rock stability

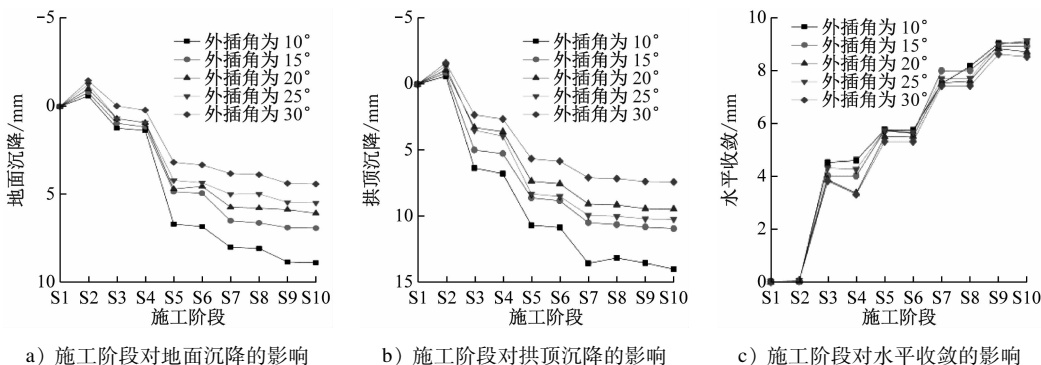


图 6 外插角对围岩稳定性的影响

Fig. 6 Influence of extrapolation angle on surrounding rock stability

拱顶都有一定程度的隆起,且随着外插角的增大而增大。在其他施工阶段,拱顶和地面都有明显的沉降,外插角越大竖向位移程度越大,从数值上分析 $\alpha = 10^\circ \sim 30^\circ$ 时地面沉降和拱顶沉降的降幅分别约为 50%、45%。且当 $\alpha = 10^\circ \sim 15^\circ$ 时相对变化最为明显,但 $\alpha = 20^\circ \sim 25^\circ$ 时地面沉降和拱顶沉降的变化量有明显的减缓趋势。

3.2.3 环向间距对支护效果的影响分析

表 1 中的模拟 1、8、9、10 是以小导管环向间距

为单一变量的模拟,从图 7 可知,随着环向间距的增大,地下通道的水平收敛和地面沉降量有增大的趋势,但是变化并不明显,拱顶沉降的变化量更小,表明环向间距对改变围岩稳定性的效果不明显。因此,对于想通过增加超前支护小导管密度来提高加固效果的方式没有明显的效果。但过大环向间距会因小导管的有效注浆半径面影响注浆质量,也会存在安全隐患。因此,环向间距应选择在 30 ~ 50 cm 之间较为合理。

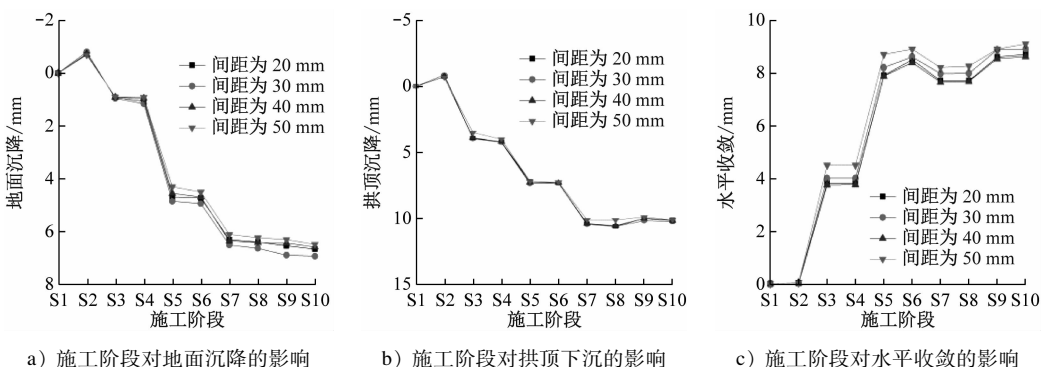


图 7 各施工阶段不同环向间距对围岩稳定性的影响

Fig. 7 Influence of different circumferential spacing on the surrounding rock stability in different construction stages

3.3 优化前后有限元模型对比

以地下通道初始设计参数建立优化前的模型,

在此基础上,根据对上述单一变量模型参数的分析总结,建立对小导管的管长、外插角、环向间距和加

固区厚度优化后的模型,优化前后的模型参数见表 3。

表 3 小导管参数
Tab.3 Small pipe parameter

优化前后	小导管参数			
	长度/ m	外插角/ (°)	环向间 距/mm	加固区 厚度/m
优化前	2.5	15	300	0.647
优化后	2.0	20	400	0.680

3.3.1 优化后有限元计算模型选取

利用 MIDAS GTS 有限元分析软件以该地下通道开挖起点处为模拟起点,每个循环步距为 3 m,总共模拟开挖 21 m,具体施工方案如表 4 所示。整个模型尺寸长为 20 m,宽为 80 m,高为 70 m,且由于地下通道的受力基本上对称。其有限元模型如图 8 所示。

表 4 小导管参数优化后的 CRD 法施工步骤

Tab.4 CRD method construction steps after small pipe parameter optimization

施工阶段	小导管支护	开挖 A 导洞	开挖 B 导洞	开挖 C 导洞	开挖 D 导洞	支护 A 导洞	支护 B 导洞	支护 C 导洞	支护 D 导洞
S1									
S2	●								
S3	●	●							
S4	●	●	●			●			
S5	●	●	●	●		●	●		
S6	●	●	●	●	●	●	●	●	
S7	●	●	●	●	●	●	●	●	●
S8	●	●	●	●	●	●	●	●	●
S9		●	●	●	●	●	●	●	●
S10			●	●	●	●	●	●	●
S11				●	●		●	●	●
S12					●			●	●
S13									●

注:●为对应阶段的主要施工内容。

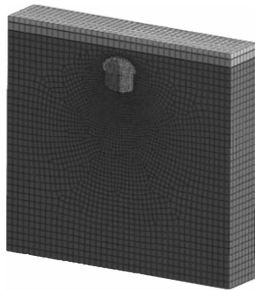


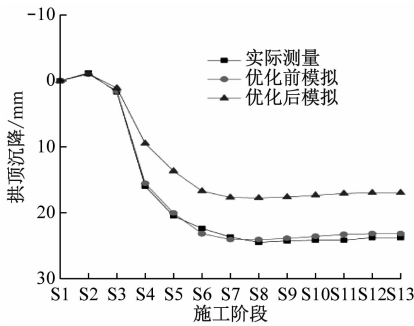
图 8 地下通道有限元模型

Fig. 8 Underground passage finite element model

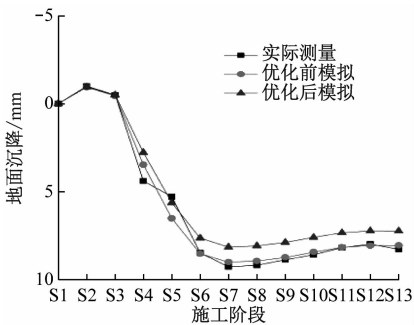
3.3.2 监测数据与数值模拟结果分析

图 9 为小导管参数优化前后模拟分析和现场实

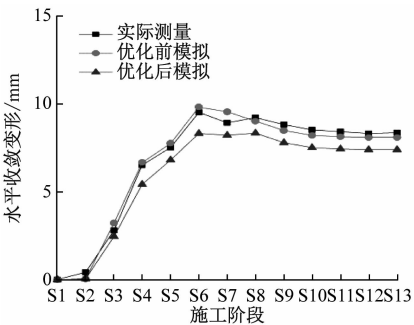
测的数据曲线。由图 9 可知,在地面沉降、拱顶下沉和水平收敛等 3 项指标的数据中,从数值上看实际监测的数据与优化前的模拟在 S1—S5 之前基本相同,S5 以后实测数据略偏大,但在误差允许范围内,且时态变化基本一致,表明所建模型的合理性。



a) 优化前后地下通道拱顶的沉降



b) 优化前后地下通道地面的沉降



c) 优化前后地下通道的水平收敛变形

图 9 优化前后和现场实测的数据曲线

Fig. 9 Data curves before and after optimization and the site measured ones

从图 9 a) 和图 9 b) 优化后模拟与优化前模拟相比,优化后的模拟最大拱顶下沉量和地面沉降量分别比优化前降低约 6.3 mm 和 1.8 mm,约占优化前的 26% 和 22.5%。表明优化后的支护结构对围岩的支护效果明显。

图 9 c) 优化前和优化后的水平收敛程度均呈先扩张,后收缩,最后趋于稳定,对比优化前后的水平收敛位移变化值,优化后的最大水平收敛值比优

化前的水平收敛变形值约小 0.7 mm, 两者相差不大, 降幅约占优化前水平收敛变形值的 8%。与单一变量模拟结果拟合, 故小导管的施工方式对水方向位移的影响不明显。

4 结论

1) 大连地下通道 CRD 法施工引起的拱顶沉降量较大, 总体变形量和变形速率在规范允许范围内, 采用 CRD 法施工时, 对超前支护的效果监测应以竖向位移为主, 其他参数为辅。

2) 调整小导管的长度和外插角可以有效增强支护效果, 最主要的体现是改变了加固区的厚度, 提高了支护效果, 但小导管长度的增大也会增加小导管的弯矩和轴力, 不利于自身材料安全; 因此在选用超前小导管的长度和外插角时应在保证自身稳定的前提下调整小导管支护参数, 以此来增强超前支护的效果。

3) 模拟数据表明单纯的增加小导管的数量, 提高小导管的密排量, 对超前支护的效果不明显, 加大环向间距虽然在数值模拟中是可行的, 但考虑到模型中没有小导管注浆模拟, 不考虑注浆质量和有效注浆半径因素的影响, 在施工现场采用过大的环向间距通常会影响到加固区的施工质量和支护效果, 不利于施工安全。

参考文献

- [1] 袁贝, 陈卫忠. 城市市区地下空间暗挖工法适应性研究[J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(4): 1172.
YUAN Bei, CHEN Weizhong. Study on adaptability of underground excavation method in urban area[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2020, 16(4): 1172.
- [2] 肖广智, 游旭. 高压水平旋喷桩超前支护技术在铁路隧道工程中的应用[J]. 现代隧道技术, 2014, 51(2): 108.
XIAO Guangzhi, YOU Xu. Application of the advance support of high-pressure horizontal jet grouting piles in tunnel engineering[J]. Modern Tunnelling Technology, 2014, 51(2): 108.
- [3] 刘志春, 李文江, 朱永全, 等. 软岩大变形隧道二次衬砌施作时机探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(3): 580.
LIU Zhichun, LI Wenjiang, ZHU Yongquan, et al. Research on construction time of secondary lining in soft rock of large-deformation tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(3): 580.
- [4] 侯公羽, 李晶晶. 弹塑性变形条件下围岩-支护相互作用全过程解析[J]. 岩土力学, 2012, 33(4): 961.
HOU Gongyu, LI Jingjing. Analysis of complete process of interaction of surrounding rock and support under elastoplastic deformation condition[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(4): 961.
- [5] 洪开荣, 杨朝帅, 李建华. 超前支护对软岩隧道空间变形的影响分析[J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10(2): 429.
HONG Kairong, YANG Chaoshuai, LI Jianhua. Analysis on impact of advanced support on space deformation of tunnel in soft rock mass[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2014, 10(2): 429.
- [6] 武松, 汤华, 罗红星, 等. 浅埋大断面公路隧道渐进破坏规律与安全控制[J]. 中国公路学报, 2019, 32(12): 205.
WU Song, TANG Hua, LUO Hongxing, et al. Progressive failure law and control criterion for safe construction of shallow buried highway tunnel with different grades of surrounding rock[J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32(12): 205.
- [7] 李风云. 隧道塌方风险预测与控制研究[D]. 长沙: 中南大学, 2011.
LI Fengyun. Study on risk prediction and control of tunnel collapse[D]. Changsha: Central South University, 2011.
- [8] 杨志男. 矿山法机械开挖初期支护结构研究及工程应用[D]. 北京: 北京建筑大学, 2020.
YANG Zhinan. Research and engineering application of supporting structure in the early stage of mechanical excavation by mining method[D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2020.
- [9] 孙振宇, 张顶立, 侯艳娟. 隧道复合支护结构协同作用的力学特性研究[J]. 铁道学报, 2019, 41(8): 131.
SUN Zhenyu, ZHANG Dingli, HOU Yanjuan. Research on mechanical property of synergistic effect of tunnel composite support structure[J]. Journal of the China Railway Society, 2019, 41(8): 131.
- [10] 张顶立, 孙振宇, 侯艳娟. 隧道支护结构体系及其协同作用[J]. 力学学报, 2019, 51(2): 577.
ZHANG Dingli, SUN Zhenyu, HOU Yanjuan. Tunnel support structure system and its synergistic effect[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2019, 51(2): 577.
- [11] 张学桥. 富水砂性软土层盾构小曲线半径下穿公路隧道施工关键技术[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(12): 128.
ZHANG Xueqiao. Key technology for construction of small radius curve shield tunnel undercrossing highway tunnel in water-rich sandy soft soil layer[J]. Urban Mass Transit, 2020, 23(12): 128.
- [12] 张民庆. 软弱围岩小导管超前预注浆工法中注浆管管长和偏角的确定[J]. 隧道建设, 1997, 17(1): 21.
ZHANG Mingqing. Determination of grouting pipe length and deflection angle in advance pre-grouting method of small pipe in weak surrounding rock[J]. Tunnel Construction, 1997, 17(1): 21.

(收稿日期: 2021-02-01)