

隧道机械化大断面进洞施工与加固措施研究

梁肖^{1,2}, 李科^{1,2}, 郭鸿雁^{2*}, 胡学兵², 姚成睿²

(1. 重庆交通大学 土木工程学院, 重庆市 400074; 2. 招商局重庆交通科研设计院有限公司, 重庆市 400067)

摘要:随着隧道施工技术与机械装备的创新发展,山岭隧道机械化钻爆施工已逐步发展起来,但山岭隧道机械化进洞施工时存在受地质因素影响大、设备适应性不高、作业空间受限等问题。该文以某隧道工程为依托项目,借助FLAC^{3D}有限差分软件对洞口浅埋段机械化大断面施工开挖方法和辅助加固措施进行了研究。对比分析了洞口浅埋段采用微台阶法施工时,不同循环进尺以及在不同掌子面进尺时掌子面加固前后的围岩位移、支护结构受力以及围岩塑性区的变化情况。研究结果表明:在不进行掌子面加固时,为保证施工安全,隧道洞口段机械化开挖循环进尺应控制在1.2 m以内,且保证超前管棚的搭接长度不小于3 m;若施工时加大循环进尺,则须对掌子面进行加固,在使用长10 m、间距1.5 m梅花形布置的玻璃纤维锚杆加固掌子面条件下,循环进尺最多可提高到1.8 m。

关键词:隧道工程;机械化开挖;洞口浅埋段;循环进尺;辅助加固措施

中图分类号:U455

文献标志码:A

Research on Mechanical Entry Excavation and Reinforcement Measures for Large Cross-Section Tunnel

LIANG Xiao^{1,2}, LI Ke^{1,2}, GUO Hongyan^{2*}, HU Xuebing², YAO Chengrui²

(1. School of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 2. China Merchants Chongqing Communications Technology Research & Design Institute Co., Ltd., Chongqing 400067, China)

Abstract: With the innovation of tunnel construction techniques and mechanical equipment, mechanical drilling and blasting for mountain tunnels have gradually developed. However, several challenges exist during the mechanical entry excavation for mountain tunnels, including the significant influence of geological factors, limited equipment adaptability, and constrained working space. This research, based on a specific tunnel project, utilized FLAC^{3D} finite difference software to study the mechanical excavation method and auxiliary reinforcement measures for shallow-buried segments at the large cross-section tunnel portal. A comparative analysis was conducted on the displacement of surrounding rock, the stress of supporting structures, and the variation of plastic zones before and after tunnel face reinforcement for different advances per cycle and faces when employing a micro-step construction method. The findings indicate that without face reinforcement, to ensure construction safety, the mechanical excavation advance in the tunnel portal should be controlled within 1.2 m per cycle, and the overlapping length of the forepoling pipes should be no less than 3 m. When increasing the advance per cycle, tunnel face reinforcement is necessary. With the use of 10-meter-long and 1.5-meter-spaced fiberglass anchors arranged in a honeycomb pattern to reinforce the tunnel face, the maximum advance per cycle can be increased to 1.8 m.

Keywords: tunnel engineering; mechanical excavation; shallow-buried segment at tunnel portal; advance per cycle; auxiliary reinforcement measure

收稿日期:2024-11-27(修改稿)

基金项目:青海省科技计划项目(编号:2023-SF-127)

作者简介:梁肖,男,硕士研究生.E-mail:1299291083@qq.com

*通信作者:郭鸿雁,男,博士,正高级工程师.E-mail:717692502@qq.com

0 引言

近年来随着隧道施工技术与机械装备的发展,机械化钻爆施工已逐渐在山岭隧道开挖过程中发展起来。然而,传统分部开挖的施工方法难以满足大型机械设备对作业空间的需求,机械化施工的优势难以体现,如何在特殊地质地段通过工法技术的改变来适应隧道机械化大断面施工的要求成为隧道机械施工能否得以全面推进的关键。

近年来,已有专家学者就隧道机械化大断面施工问题开展了相关研究工作。王志坚^[1]依托郑万高铁湖北段隧道工程,对隧道机械化施工过程中的掌子面稳定措施、支护结构参数优化、机械化施工方法以及施工工艺参数的选取等方面进行了研究;于丽等^[2]通过对郑万高铁大型机械化隧道围岩压力的监控量测,明确了在Ⅳ、Ⅴ级围岩条件下深埋隧道机械化施工过程中的围岩压力变化规律和分布特征;田佳等^[3]依托新华隧道工程,通过现场试验,提出了隧道施工生产作业线的新型施工组织模式,解决了在Ⅳ、Ⅴ级软弱围岩条件下进行机械化大断面连续施工的难题;王明年等^[4]通过对初期支护现场量测以及对监控量测数据的分类统计和回归分析,得出了在Ⅳ、Ⅴ级围岩深浅埋不同机械化大断面开挖状态下,初期支护位移沿隧道纵向的函数表达式及各工况下分段位移占极限位移的比值;刘江等^[5]将涨壳式预应力中空锚杆成功应用至郑万高铁隧道工程,解决了软弱围岩条件下隧道机械化大断面开挖后快速支护的难题;王安^[6]以川藏铁路隧道为依托,介绍了隧道台阶法施工时机械化的配置以及微台阶法施工方法;李忠等^[7]就洞口浅埋段隧道大变形问题,对比分析不同的施工工法,经现场施工验证,三台阶临时仰拱法可有效控制隧道初支的大变形;李鹏飞等^[8]总结出隧道围岩的变形从空间上可分为掌子面超前变形、掌子面挤出变形和掌子面后方变形。针对掌子面挤出变形,文献^[9-11]提出使用玻璃纤维锚杆、预应力锚杆对掌子面进行加固的效果显著;李斌等^[12]通过理论分析,提出了掌子面玻璃纤维锚杆的密度、长度以及加固范围等参数的确定方法,并通过数值模拟手段,确定了该方法的有效性;王秀英等^[13]则从工程应用的角度出发,总结掌子面玻璃纤维锚杆的最优参数;文献研究表明:采用玻纤锚杆可以提高核心土体的强度和刚度,且较大程度减小了隧道的变形^[14]。

就目前的研究成果来看,现阶段研究主要针对隧道主洞深埋段Ⅳ、Ⅴ级围岩机械化大断面施工条件下隧道的施工方法、围岩稳定性、辅助加固参数等问题,少有涉及隧道浅埋段进洞施工方法的研究,然而隧道洞口段的围岩地质条件往往更差,机械化大断面施工安全风险更高。基于此,本文以某隧道工程为例,通过三维数值仿真分析,研究隧道机械化大断面进洞施工方法与辅助加固措施,在保证隧道施工安全前提下提出合理的开挖循环进尺、辅助加固措施,可为类似隧道工程施工提供技术支撑。

1 工程概况

依托工程隧道长约5.4 km,隧道最大埋深约642 m。地质调查及钻孔揭露表明:拟建隧道区分布的地层岩性种类较多,由上至下主要有第四系地层(Q_4)、寒武系公养河群第四段($\in gn^4$)、寒武系公养河群第三段($\in gn^3$)、寒武系公养河群第二段($\in gn^2$)、寒武系公养群第一段($\in gn^1$)。隧址区未见不良地质作用、特殊岩土分布,隧道施工时,洞口段覆盖层厚度10~25 m,洞口段斜坡地形坡度较陡,施工安全风险较大。

2 施工开挖方法与辅助加固措施研究

2.1 计算分析模型与工况

根据设计资料,当采用一般工法时洞口浅埋段设计有管棚支护,为适应机械化开挖,采用微台阶施工开挖方法时,需要对掌子面的稳定性以及加固措施进行研究。采用FLAC^{3D}建立有限元模型,模型宽度取值100 m(x 方向),纵向长度110 m(y 方向,即隧道掘进方向),隧道洞口至围岩上表面距离为10 m。模型包含110 000个单元,数值模型如图1所示。采用服从Mohr-Coulomb屈服破坏准则的实体单元模拟岩体,初期支护采用弹性Shell单元模拟,超前管棚采用桩结构单元,玻璃纤维锚杆则采用锚结构单元进行模拟。整个模型的上表面为自由边界,模型底面和侧面均施加法向约束。

计算工况包括:未采取掌子面加固措施条件下循环进尺依次为0.6 m、1.2 m、1.8 m与2.4 m;采用掌子面加固措施条件下循环进尺依次为7.2 m、14.4 m、21.6 m、28.8 m。

2.2 计算参数选取

根据依托工程概况,隧道洞口浅埋段围岩级别为Ⅴ₂级,岩土体计算参数参照依托工程地勘报告,支

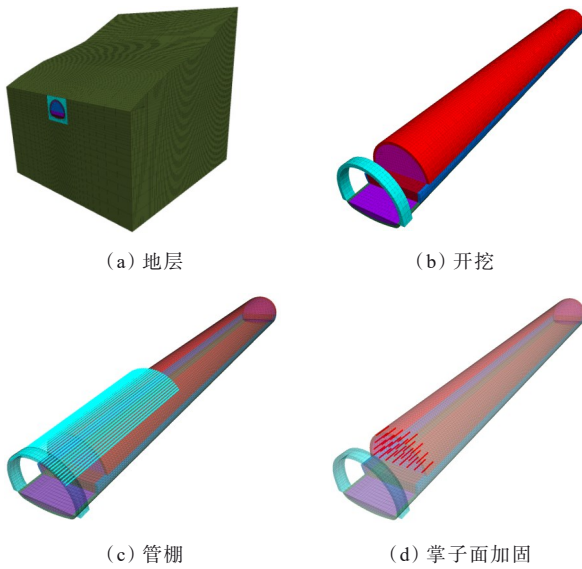


图1 计算分析模型

Figure 1 Computational analysis model

护参数根据《公路隧道设计规范 第一册 土建工程》(JTJ 3370.1—2018)^[15]进行取值,具体如表1所示。超前预加固采用直径108 mm、壁厚6 mm的大管棚。

表1 计算力学参数

Table 1 Calculated mechanical parameters

材料名称	弹性模量 E/GPa	泊松比 ν	重度 $\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$	黏聚力 c/MPa
围岩	1.15	0.42	17.5	21	0.085
管棚	20.00	0.20	25.0	—	—
初期支护	26.00	0.20	22.0	—	—

2.3 掌子面未加固条件下

2.3.1 围岩位移状态分析

为便于对比分析,提取不同循环进尺条件下的围岩变形速率值,进一步分析循环进尺对变形速率的影响,结果如图2所示。

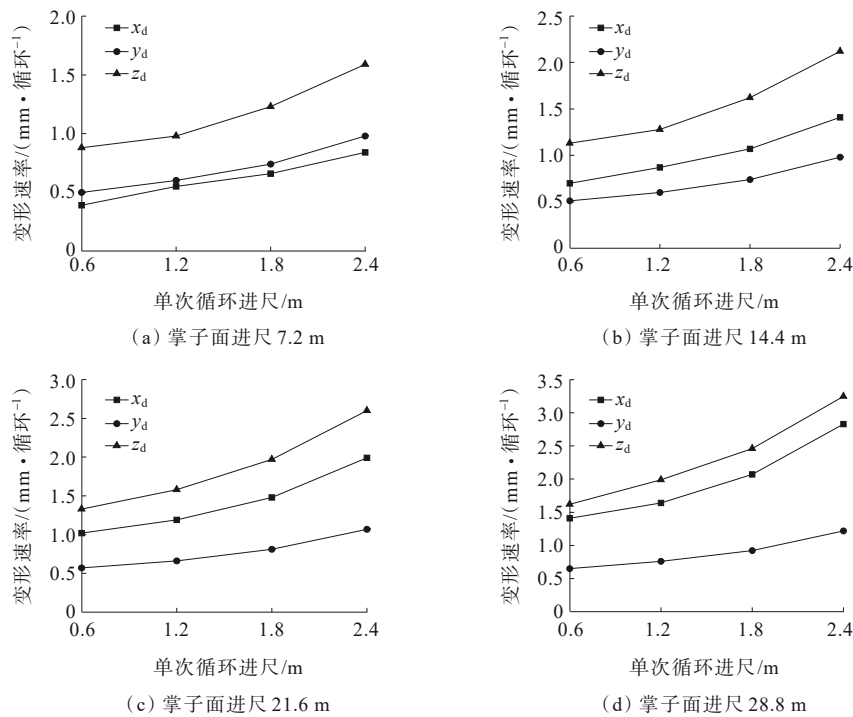


图2 围岩变形速率随循环进尺变化规律图

Figure 2 Variation of deformation rate of surrounding rock with advance per cycle

由图2可知:隧道洞口浅埋段采用微台阶法施工时,在相同循环进尺条件下,掌子面单次循环进尺越大,围岩收敛变形也越大,且有围岩沉降收敛速率(z_d)>水平收敛速率(x_d)>掌子面挤出变形速率(y_d),当单次循环进尺超过1.8 m时,围岩变形速率受循环进尺增大的影响越发明显,且围岩平均的沉降变形速率大于2.5 mm,围岩开挖时的单次沉降变形速率势必大于2.5 mm,按2~3倍平均变形速率取值,

大于5 mm,围岩失稳安全事故风险较大,即从围岩变形控制角度考虑,当采用微台阶施工时,单次循环进尺宜控制在1.2 m。

2.3.2 支护结构力学特性分析

为了便于对比分析不同循环进尺对于支护结构力学行为的影响,提取不同工况下隧道初期支护的最大主拉应力值、最大主压应力值以及管棚的最大压应力值,研究各特征值随循环进尺的变化规律,结

果如图3~5所示。

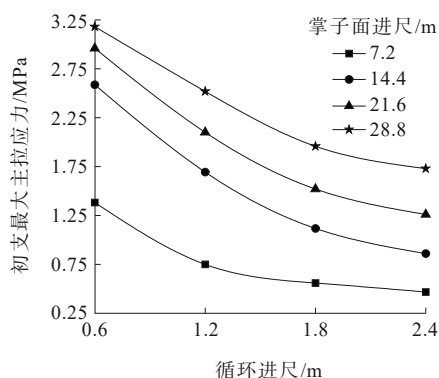


图3 初支最大主拉应力随循环进尺变化规律

Figure 3 Variation of maximum principal tensile stress of initial support with advance per cycle

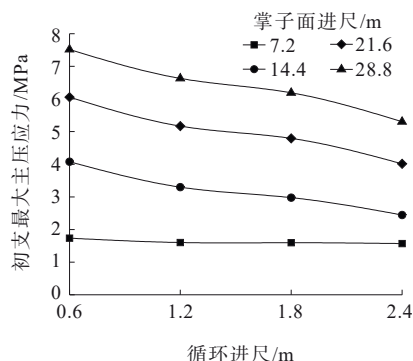


图4 初支最大主压应力随循环进尺变化规律

Figure 4 Variation of maximum principal compressive stress of initial support with advance per cycle

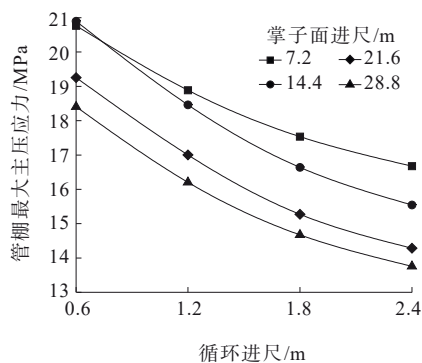


图5 管棚轴向最大压应力随循环进尺变化规律

Figure 5 Variation of maximum axial compressive stress in pipe shed with advance per cycle

由图3可知:初期支护的最大主拉应力随着掌子面进尺的增大而增大,随着循环进尺的不断增大而减小,且循环进尺越大,曲线斜率越小,即循环进尺的增大对初支最大主拉应力的影响随之减小。所有计算工况中,初支最大主拉应力强度超过喷射混凝土的抗拉强度标准值(1.78 MPa)占比为37.5%,施工

过程中可能造成拱部初支开裂。

由图4可知:初期支护的最大主压应力随着掌子面进尺的增大而增大,其所有计算工况初支最大主压应力均小于喷射混凝土的抗压强度标准值(16.7 MPa),支护结构稳定。

由图5可知:管棚轴向最大主压应力随着掌子面进尺的增大而减小,随着循环进尺的不断增大而减小,且循环进尺越大,曲线斜率越小,即循环进尺的增大对管棚轴向最大主压应力的影响随之减小,所有计算工况管棚轴向最大主压应力均满足设计要求。

总体而言,隧道初期支护应力随着掌子面进尺的增大而增大,管棚轴向压应力随着掌子面进尺的增大而减小;初期支护与管棚受力随着循环进尺的增大而减小。其原因在于掌子面进尺增加,隧道埋深增大,支护结构应力与管棚拉应力势必增大,管棚轴向压应力减小;另外,循环进尺越大,围岩应力释放时间较长,残余的围岩应力较小,从而导致初期支护与管棚受力减小。

2.3.3 围岩塑性状态分析

提取不同工况下隧道施工开挖后围岩塑性区分布图如图6、7所示,对比分析围岩稳定性状态,提出合理的循环开挖进尺。

由图6、7可知:

(1) 洞口浅埋段采用微台阶施工后,随着掌子面进尺的增加,埋深增大,管棚外移,隧道围岩塑性区呈逐渐增大趋势。隧道进洞初期,仰拱底部塑性区较拱部大,随着掌子面掘进,仰拱底部塑性区深度逐步趋于平稳,而拱部塑性区逐步向外扩展延伸,同时掌子面塑性区也由底部向上、向前发展。当掌子面进尺不同,隧道埋深不同时,循环进尺对于围岩塑性区分布的影响也有所不同。

(2) 当掌子面进尺为28.8 m时,4种工况掌子面塑性区均贯通,掌子面前方塑性区最大深度为3.0 m,掌子面易失稳,此时掌子面前方管棚能够提供的抵抗力较小,管棚支护作用基本失效。因此,管棚应保证足够的搭接长度,须超过塑性区最大深度,即不小于3 m。

综上所述,对于洞口浅埋段,当采用微台阶施工且掌子面不采用任何加固稳定措施条件下,掌子面的最大循环进尺为1.2 m,且保证超前管棚的搭接长度大于3 m。

2.4 掌子面加固条件下

根据上节计算结果,隧道采用微台阶法施工,掌

子面的稳定性影响隧道进洞施工安全。当循环进尺大于 1.2 m 时,掌子面塑性区贯通,掌子面前方最大塑性区深度为 3 m,掌子面易失稳坍塌,施工安全风险大。拟采用上台阶玻璃纤维锚杆进行掌子面加

固,玻纤锚杆长 10 m,间距为 1.5 m,搭接长度为 2.8 m (>2.4 m),梅花形布置,数值分析模型见图 1(d),玻纤锚杆力学参数如表 2 所示。

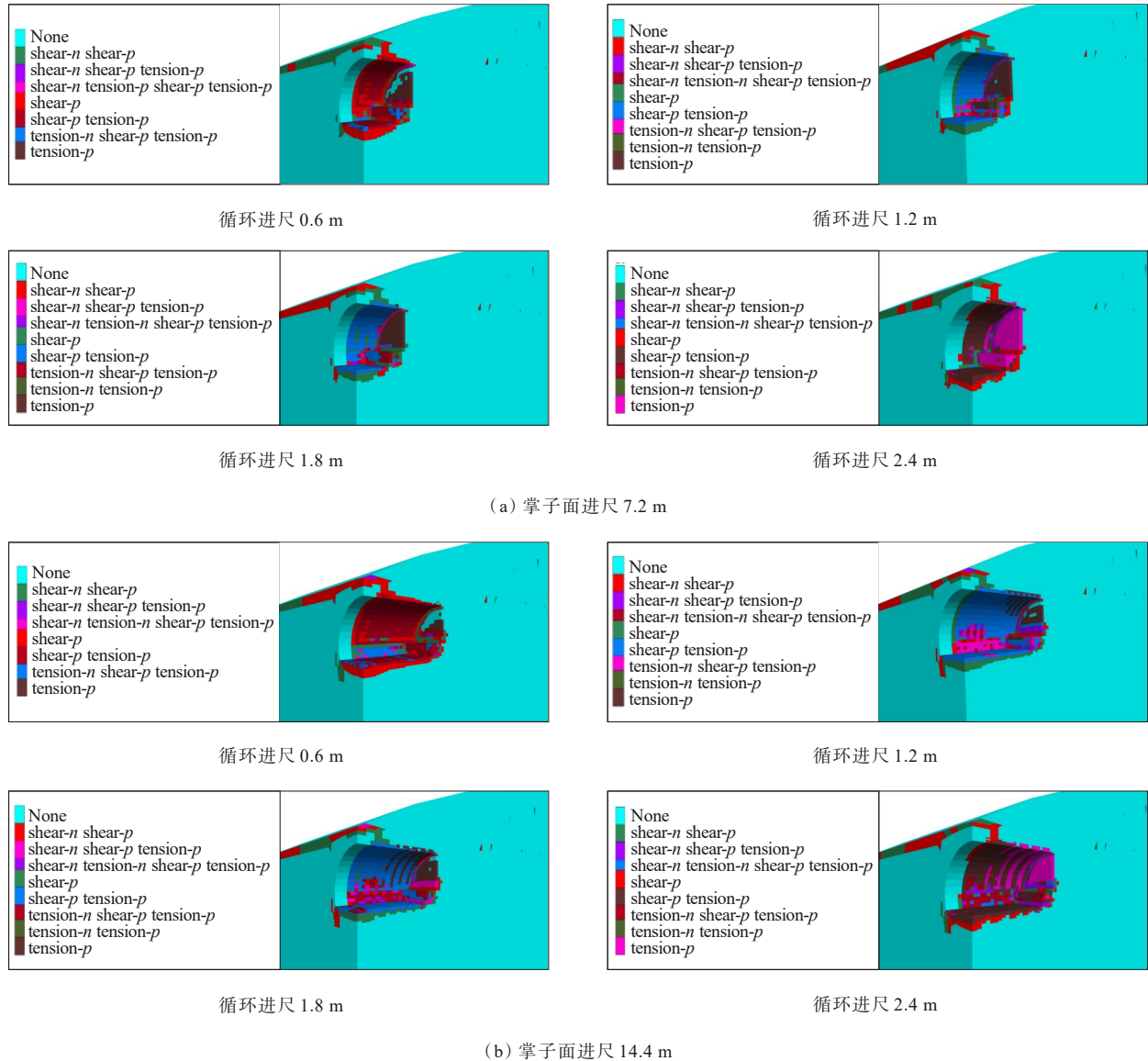


图 6 不同循环加载条件下围岩塑性区分布(掌子面进尺 7.2 m、14.4 m)

Figure 6 Distribution of plastic zone of surrounding rock under different advances per cycle (tunnel face advance of 7.2 m, 14.4 m)

2.4.1 围岩位移状态对比分析

为便于对比分析,提取不同工况下掌子面加固前后围岩变形的典型特征值并绘制成直方图,如图 8 所示。

由图 8 可知:掌子面加固对围岩各项变形指标的控制有一定作用,循环进尺越大控制效果越明显,其中掌子面挤出变形的控制更为突出,对沉降收敛的控制效果次之,对于水平收敛几乎没有影响,部分工

况还存在略微增大的现象,但并不影响施工安全。总之,从变形对比分析结果来看,采取合理的掌子面加固措施有利于控制掌子面过度变形,从而降低施工安全风险。

2.4.2 支护结构力学特性对比分析

为便于对比分析,提取不同工况下掌子面加固前后初期支护以及管棚受力的典型特征值并绘制成直方图,如图 9、10 所示。

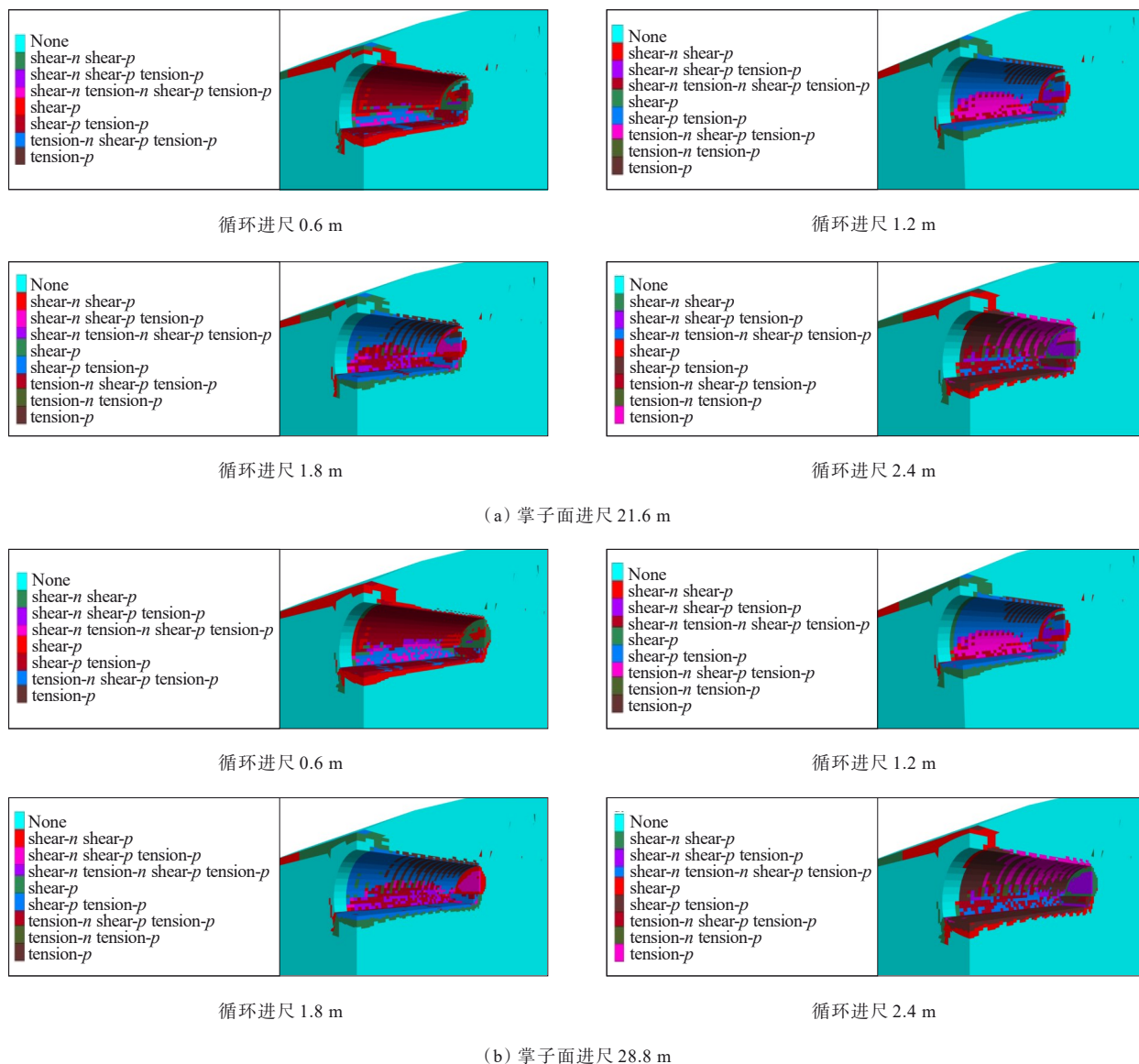


图7 不同循环加载条件下围岩塑性区分布(掌子面进尺 21.6 m、28.8 m)

Figure 7 Distribution of plastic zone of surrounding rock under different advances per cycle (tunnel face advance of 21.6 m, 28.8 m)

由图9可知:在洞口浅埋段采用微台阶施工,掌子面采用玻璃纤维锚杆加固且掌子面处于管棚两端时,玻纤锚杆所受的最大轴向拉力约为18 kN;当掌子面处于管棚中部时,玻纤锚杆的最大轴向拉力相对最小,约为15 kN。考虑一定的安全系数(取2.0),玻璃纤维锚杆的抗拔力建议取36 kN。

由图10可知:由于玻璃纤维锚杆的加固作用,掌子面得以加固,围岩应力释放向管棚转移,导致管棚受力增大;由于管棚力的传递作用,初期支护的主拉应力、主压应力并未发生较大的变化。当循环进尺为1.8 m时,初支主拉应力略微减小,有利于结构施工过程中的结构安全;当循环进尺为2.4 m时,初期支护主压应力略微增大,均小于喷射混凝土的设计

抗压强度,满足施工安全要求;循环进尺在1.8 m和2.4 m两种工况条件下,管棚受力均有较大的增长,但均小于管棚材料的设计强度,满足施工安全要求。

总体而言,从结构受力角度来说,除循环进尺为1.8 m,掌子面进尺为28.8 m时,套拱附近初支拱顶喷射混凝土达到混凝土的抗拉设计强度外(但小于极限抗拉强度),其余工况条件下初支及管棚的受力均小于材料的设计强度,说明通过掌子面加固,两种循环进尺均能满足结构施工安全要求。

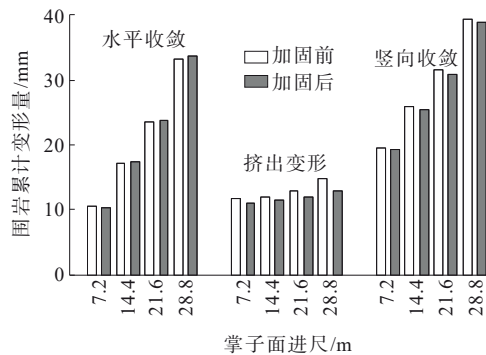
2.4.3 围岩塑性状态对比分析

提取两种工况(循环进尺为1.8 m与2.4 m)条件下,不同掌子面进尺时,隧道围岩塑性区分布图,进行对比分析,具体见图11、12。

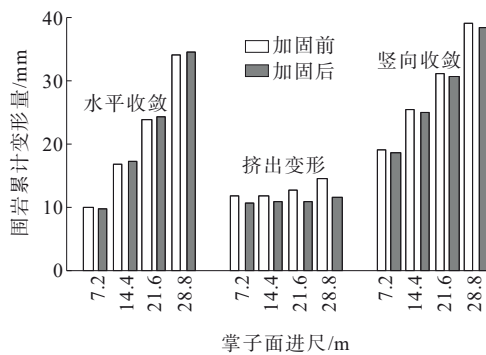
表2 玻璃纤维锚杆物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical parameters of fiberglass anchors

规格	外径/ mm	厚度/ mm	截面积/ mm ²	极限荷 载/kN	抗拉强 度/MPa
FL30×7	30	7	210	118	562



(a) 循环进尺 1.8 m



(b) 循环进尺 2.4 m

图8 掌子面加固对围岩变形影响对比分析直方图

Figure 8 Histogram of comparative analysis of effect of tunnel face reinforcement on deformation of surrounding rocks

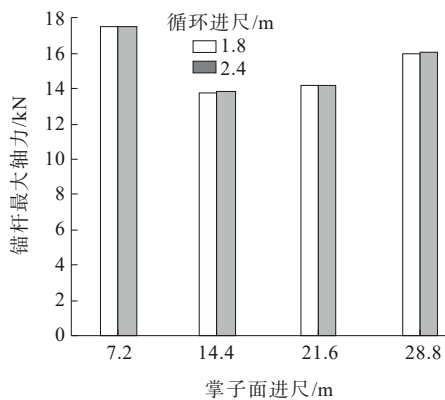
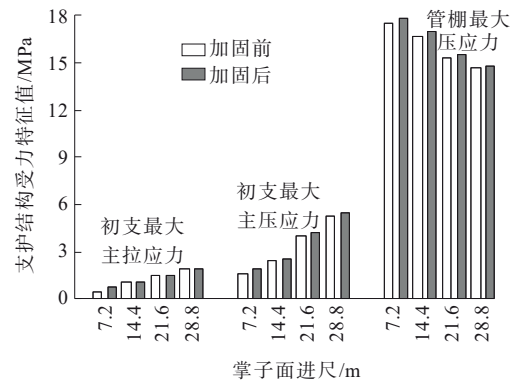
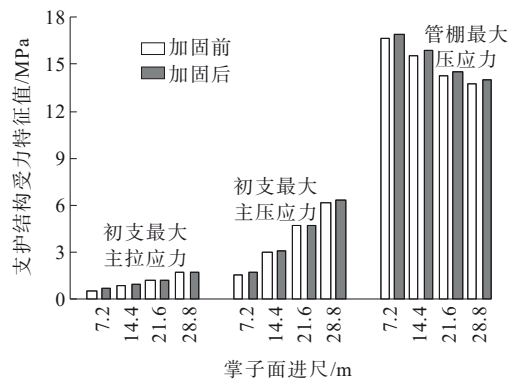


图9 不同循环进尺条件下不同掌子面进尺时锚杆最大轴力分布直方图

Figure 9 Histogram of maximum axial force distribution of anchor at different tunnel faces with various advances per cycle



(a) 循环进尺 1.8 m



(b) 循环进尺 2.4 m

图10 掌子面加固对支护受力影响对比分析直方图

Figure 10 Histogram of comparative analysis of effect of tunnel face reinforcement on support force

由图11、12可知:①当循环进尺为1.8 m且采用掌子面加固后,隧道进洞施工过程中,掌子面塑性区得到明显改善,4种掌子面进尺的计算结果所显示的塑性区均未贯通,掌子面前方最大塑性区深度也由未加固前的3.0 m减小到1.8 m,加固效果较为明显;②当循环进尺为2.4 m且采用掌子面加固后,隧道进洞施工过程中,掌子面塑性区得到明显改善,掌子面进尺为7.2 m和14.4 m两种工况的计算结果所显示的塑性区均未贯通。当掌子面进尺为21.6 m时,掌子面塑性区即将贯通,处于临界失稳状态;当掌子面进尺为28.8 m时,掌子面塑性区贯通,掌子面围岩已失稳,施工安全风险较高,但掌子面前方最大塑性区深度也从未加固前的3.0 m减小到1.8 m,说明掌子面加固发挥了一定的作用。

综上所述,在掌子面上台阶采用玻璃纤维锚杆加固后,其加固效果良好,抑制了掌子面塑性区的发展,当循环进尺小于等于1.8 m时,掌子面塑性区较小,并未贯通,掌子面前方最大塑性区深度为1.8 m,围岩稳定性较好,施工安全风险较低。

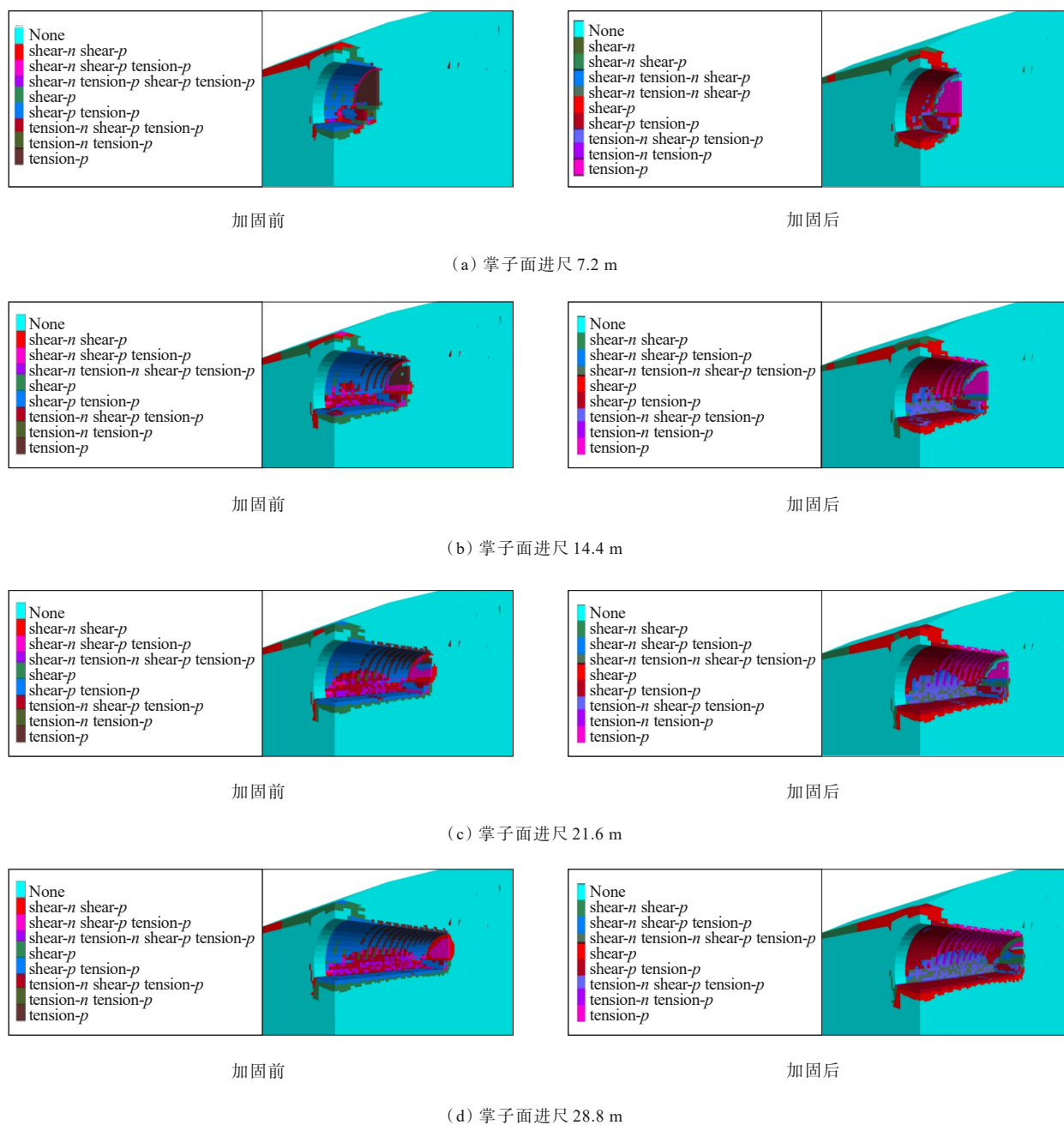


图 11 掌子面加固前后围岩塑性区分布对比分析(循环进尺 1.8 m)

Figure 11 Comparative analysis of distribution of plastic zone of surrounding rock before and after tunnel face reinforcement (with an advance per cycle of 1.8 m)

2.5 工程验证

为验证数值模拟结果,在隧道进洞时采用了管径 108 mm、间距 0.4 m、搭接长度为 4 m 的管棚进行预加固,同时对掌子面采用长 10 m、间距 1.5 m 梅花形布置的玻璃纤锚杆进行加固。并监测为期 30 d 的地表沉降以及隧道开挖后拱顶的沉降值。洞口地表监测点如图 13 所示。地表沉降累计值见图 14,拱顶沉降如图 15 所示。

由图 14、15 可知:隧道进洞开挖后两周地表沉降和拱顶变形速率最大,随后各测点日均沉降变形量逐步减小,地表位移累计沉降值 $DB4 > DB3 > DB5 > DB2 > DB1 > DB6 > DB7$,隧道拱顶上方地表位移累计沉降值最大,隧道左侧地表沉降略高于右侧,图 15 中隧道拱顶沉降量与图 14 中 DB4 测点沉降量增长趋势和累计沉降值相近。同时,采用玻璃纤维锚杆加固掌子面后,地表沉降量未超过图 8 中围岩竖向累计

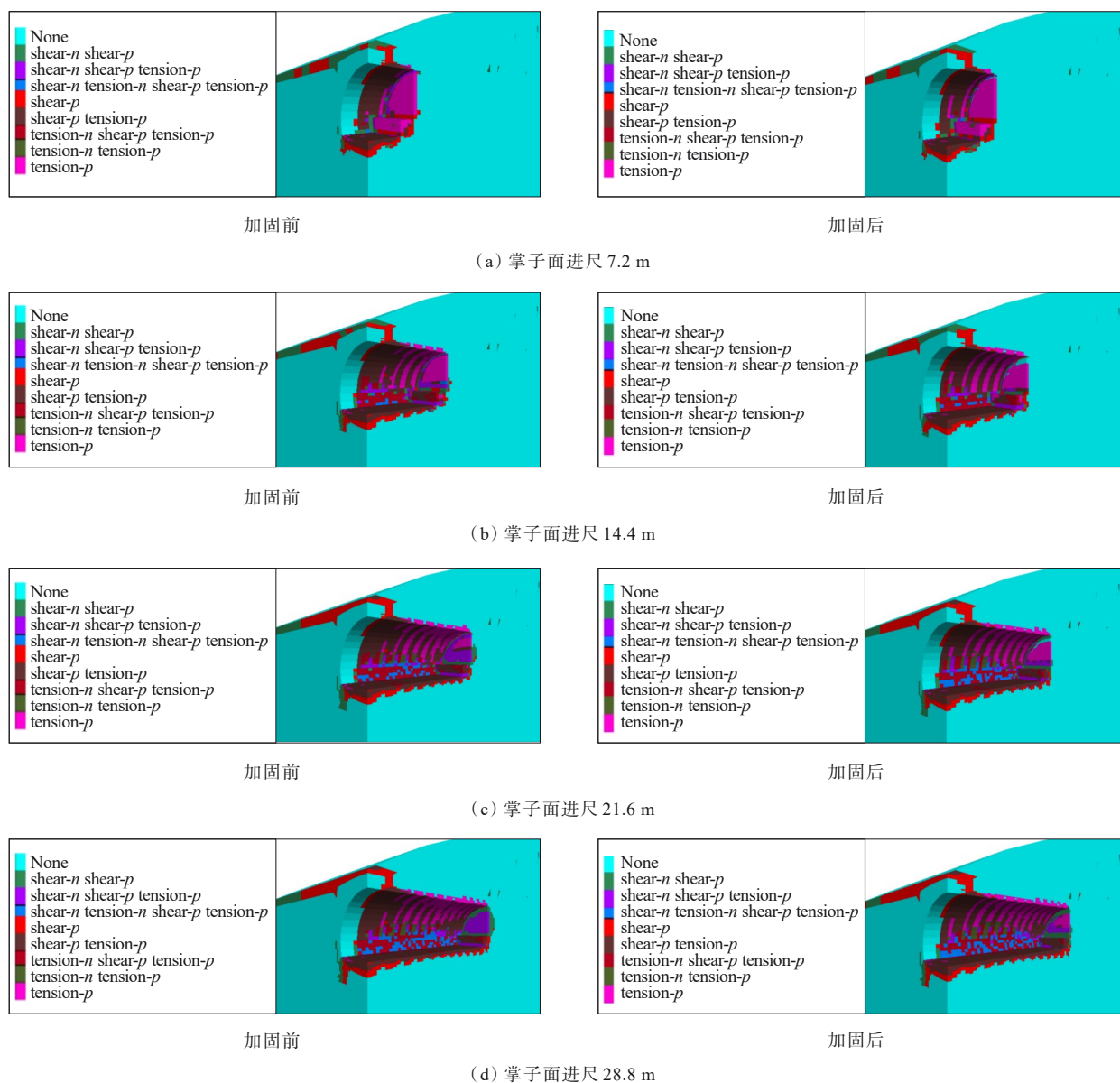


图 12 掌子面加固前后围岩塑性区分布对比分析(循环进尺 2.4 m)

Figure 12 Comparative analysis of distribution of plastic zone of surrounding rock before and after tunnel face reinforcement (with an advance per cycle of 2.4 m)

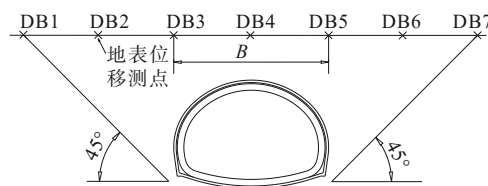


图 13 地表位移测点布置图

Figure 13 Arrangement of surface displacement measurement points

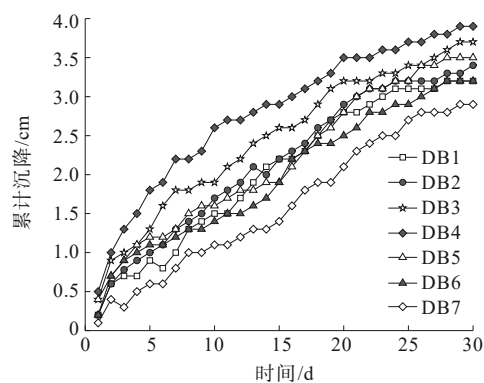


图 14 地表位移累计沉降量

Figure 14 Cumulative settlement value of surface displacement

变形量,验证了在管棚预加固条件下,采用玻璃纤维锚杆辅助加固掌子面对洞口浅埋段隧道进洞施工的可行性。

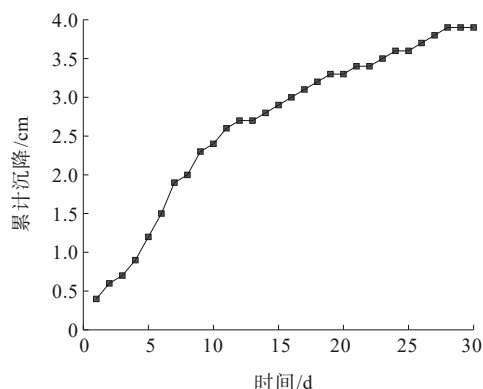


图15 拱顶累计沉降量

Figure 15 Cumulative settlement value of arch top

3 结论

本文通过数值分析方法,对比分析了隧道洞口浅埋段采用微台阶施工时,不同循环进尺(0.6 m、1.2 m、1.8 m以及2.4 m)在不同掌子面进尺(7.2 m、14.4 m、21.6 m以及28.8 m)时采用掌子面加固前后的围岩位移、支护结构受力以及围岩塑性区变化情况,提出了合理的循环进尺与辅助加固措施,得出以下结论:

(1) 在不进行掌子面加固的条件下,为保证施工安全,隧道洞口段机械化开挖的循环进尺应控制在1.2 m以内,且超前管棚的搭接长度应大于3 m。

(2) 掌子面的稳定对施工安全的影响很大,若要提高机械化施工效率,增大洞口段开挖循环进尺,则必须对掌子面进行加固;玻璃纤维锚杆对掌子面的加固效果明显,在采用长10 m、间距1.5 m梅花形布置的玻璃纤维锚杆进行掌子面加固的条件下,隧道洞口段机械化开挖的循环进尺可提高到1.8 m。

(3) 结合依托工程概况,在洞口段采取了相应的加固措施,并监测了30 d的地表和拱顶位移沉降值,监测数据显示,其沉降累计值与数值模拟加固后围岩累计变形量相差不大,验证了采用玻璃纤维锚杆加固掌子面的良好作用。

参考文献:

References:

- [1] 王志坚. 郑万高铁隧道大断面机械化施工关键技术研究[J]. 隧道建设(中英文), 2018, 38(8): 1257-1270.
WANG Zhijian. Research on key technology of large cross-sectional mechanized construction of Zhengzhou-Wanzhou High-Speed Railway tunnel[J]. Tunnel Construction, 2018, 38(8): 1257-1270.
- [2] 于丽, 王志龙, 杨涅. 机械化施工大断面高铁隧道围岩压

- 力测试及分布特征研究[J]. 隧道建设(中英文), 2018, 38(8): 1303-1310.
- YU Li, WANG Zhilong, YANG Nie. Study of measurement and distribution characteristics of surrounding rock stress of large cross-sectional high-speed railway tunnel with mechanized construction[J]. Tunnel Construction, 2018, 38(8): 1303-1310.
- [3] 田佳, 李金鹏. 软弱围岩地层隧道大断面机械化施工工法应用[J]. 隧道建设(中英文), 2018, 38(8): 1350-1360.
TIAN Jia, LI Jinpeng. Application of mechanized construction method to large cross-sectional tunnel with soft surrounding rocks[J]. Tunnel Construction, 2018, 38(8): 1350-1360.
- [4] 王明年, 赵思光, 张霄. 郑万高铁大型机械化施工隧道位移控制基准研究[J]. 隧道建设(中英文), 2018, 38(8): 1271-1278.
WANG Mingnian, ZHAO Siguang, ZHANG Xiao. Study of displacement control criterion for large-scale mechanized construction of tunnels on Zhengzhou-Wanzhou High-Speed Railway[J]. Tunnel Construction, 2018, 38(8): 1271-1278.
- [5] 刘江, 王军, 徐腾辉. 涨壳式预应力中空锚杆在机械化开挖大断面隧道中的施工应用研究[J]. 隧道建设(中英文), 2018, 38(增刊2): 324-329.
LIU Jiang, WANG Jun, XU Tenghui. Study on construction application of expanded shell prestressed hollow anchor rod in mechanized excavation of large section tunnel[J]. Tunnel Construction, 2018, 38(sup 2): 324-329.
- [6] 王安. 高原隧道软弱围岩开挖技术研究[J]. 中外公路, 2021, 41(增刊2): 159-161.
WANG An. Study on excavation technology of weak surrounding rock in plateau tunnel[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2021, 41(sup 2): 159-161.
- [7] 李忠, 王伟, 林玉刚, 等. 浅埋段软岩隧道施工工法优化模拟应用分析[J]. 中外公路, 2021, 41(3): 230-236.
LI Zhong, WANG Wei, LIN Yugang, et al. Application analysis of optimization simulation of construction method for shallow buried soft rock tunnel[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2021, 41(3): 230-236.
- [8] 李鹏飞, 赵勇, 刘建友. 隧道软弱围岩变形特征与控制方法[J]. 中国铁道科学, 2014, 35(5): 55-61.
LI Pengfei, ZHAO Yong, LIU Jianyou. Deformation characteristics and control method of tunnel with weak surrounding rock[J]. China Railway Science, 2014, 35(5): 55-61.
- [9] 郝志喜. 软弱破碎围岩隧道进洞新工法数值模拟及支护参数研究[J]. 工程建设与设计, 2019(21): 92-96, 107.
HAO Zhixi. Study on numerical simulation and supporting parameters of new tunnel entrance excavation method with weak surrounding rock[J]. Construction & Design for Engineering, 2019(21): 92-96, 107.
- [10] 崔柔柔, 杨其新, 蒋雅君. 软岩隧道掌子面玻璃纤维锚杆加固参数研究[J]. 铁道标准设计, 2015, 59(11): 79-83.
CUI Rourou, YANG Qixin, JIANG Yajun. Study on reinforcement parameters of fiber glass anchor bar at soft-rock tunnel face[J]. Railway Standard Design, 2015, 59(11): 79-83.