

大断面隧道超前小导管多参数耦合优化研究

何 俊

(深圳市恒浩建工程项目管理有限公司,广东 深圳 518000)

摘要:超前支护参数优化是超大断面隧道施工中控制围岩稳定的核心问题。文章以深汕合作区某单洞四车道隧道为工程背景,采用数值模拟与现场监测相结合的手段,系统研究了超前小导管注浆加固层厚度、小导管长度、外插角、直径及环向间距等关键参数对围岩位移演化规律的影响。结果表明:注浆加固层厚度与小导管结构参数对围岩位移场的调控效果显著,影响幅值达1.3%~16.3%;当导管长度为4.5 m时支护效果最优,此时围岩位移随参数变化呈非线性递减趋势。当外插角取10°、环向间距取0.4 m时,可形成协同支护体系,实现破碎区加固效果与导管受力状态的最佳平衡。经现场监测验证,优化后的支护方案有效控制了拱顶沉降与仰拱隆起,围岩变形显著降低,在保障施工安全与提升施工效率的同时,具有显著的技术经济效益。

关键词:大断面隧道;超前小导管;参数优化;围岩稳定性;注浆加固;现场监测

中图分类号:U455.7⁺2

文献标志码:A

文章编号:1673-8993(2026)04-0035-07

doi:10.13402/j.gcjs.2026.04.040

Research on multi-parameter coupling optimization of leading small conduits in large section tunnels

HE Jun

(Shenzhen Henghao Construction Project Management Co., Ltd., Shenzhen 518000, Guangdong, China)

Abstract: Optimization of advanced support parameters is a core issue in controlling surrounding rock stability during the construction of ultra-large cross-section tunnels. Taking a single-bore four-lane tunnel in the Shenzhen-Shanwei special cooperation zone as the background, this study systematically investigates the influence of key parameters—such as the thickness of the grouted reinforcement layer, the length of small pipes, the outer plug angle, diameter, and circumferential spacing—on the evolution of surrounding rock displacement through numerical simulation and field monitoring. The results indicate that the thickness of the grouted reinforcement layer and the structural parameters of small pipes significantly affect the distribution of surrounding rock displacement fields, with an influence amplitude of 1.3% to 16.3%, demonstrating substantial regulatory effects. When the pipe length is 4.5 m, the support effect is optimal, and surrounding rock displacement exhibits nonlinear reduction. With an optimal outer plug angle of 10° and a circumferential spacing of 0.4 m, a synergistic support system can be formed, achieving the best balance between reinforcement in fractured zones and pipe stress. Field monitoring verification confirms that the optimized support scheme effectively controls vault settlement and invert uplift, significantly reduces surrounding rock deformation, and enhances both construction safety and efficiency while delivering favorable economic and social benefits.

Key words: large section tunnel; advanced small pipe; parameter optimization; rock mass stability; grouting reinforcement; field monitoring

当前,我国交通路网建设正处于高速发展期,各类地下通道工程呈现爆发式增长态势^[1]。然而,受

收稿日期:2025-10-17

作者简介:何俊(1982—),男,高级工程师,从事道桥与隧道工程方面的管理工作。

复杂地质条件的影响,隧道施工常需穿越破碎地质区段,围岩在初期支护作用下易产生过大变形,因此超前小导管支护成为控制围岩稳定的关键技术之一。近年来,国内外学者围绕超前小导管支护参数优化开展了大量研究,但多聚焦于单一指标的影响分析,而实际工程中需综合考虑围岩变形、结构受力等多因素协同作用。此外,针对特殊不良地质条件下的超前支护研究仍相对不足,亟需进一步探索。

在超前小导管参数优化方面,王婧等^[2]通过数值模拟发现,环向间距对拱顶沉降的影响最为显著,并基于地表沉降和拱顶沉降数据提出了合理的布置参数。王东剑^[3]研究发现,外插角对加固效果敏感性较高,15°为最优角度,而长度超过4 m后加固效果提升有限。李金奎等^[4]通过现场监测与模拟对比指出,管长和外插角是影响支护效果的主要因素,环向间距则需根据注浆半径确定。此外,陈光友等^[5]在砂化白云岩地层中提出长度3 m、环向间距0.2 m的组合参数,有效减少了围岩掉块和超挖现象。陈家征等^[6]则通过注浆圈厚度优化,验证了8 m注浆圈与渗透系数比为100的合理性。

针对特殊地质条件下的支护优化,夏曾银等^[7]发现膨胀性泥岩隧道中双层初支变形降幅达到63.88%以上,显著改善受力状态。魏晓波^[8]通过现场数据验证了层状岩隧道支护设计的可靠性。谢壁婷等^[9]基于总安全系数法优化支护参数,并通过工程实试验证了其安全性。杨晓华等^[10]和张佳华等^[11]分别通过试验和理论分析,补充了支护设计规范的应用依据。资晓鱼等^[12]通过参数调整,有效改善了隧道偏压受力问题。在超前小导管作用机理方面,安永林等^[13]提出管径、开挖进尺和埋深对掌子面稳定性的影响规律,并指出存在最优外插角。邓祥辉等^[14]对比不同支护方案,表明联合支护效果最优。然而,现有研究多局限于单一指标分析,缺乏多参数协同优化与综合评价体系。

基于此,本研究通过数值模拟系统分析小导管长度、环向间距、管径、外插角及加固区厚度对围岩变形与结构受力的影响,建立多指标综合评价模型,提出最优参数组合(小导管长度4.5 m、环向间距0.4 m、直径为42 mm、外插角为10°、加固区

厚度为2.5 m时为最优参数组合),并结合现场试验验证优化效果,以期可为部分围岩破碎的隧道超前支护设计提供理论支撑与工程参考。

1 工程背景

1.1 项目情况

本文依托工程为深汕合作区某市政道路隧道(图1),采用矿山法施工,呈曲线布置,采用分离式设置,左线隧道总长度为1 288 m,右线隧道总长度为1 320 m,该隧道最大覆岩厚度达184.3 m,设计行车速度为60 km/h,采用分离式双向八车道布置方案。隧道断面采用三心圆拱形结构,其断面尺寸参数:最大开挖宽度为18.762 m,最大建筑限界高度为11.542 m,隧道开挖全断面面积为175.2 m²,属于大断面隧道。以左线ZK1+765-ZK1+940为开挖实例,采用三台阶开挖,该段为IV级围岩,沿线场地未发现溶洞、崩塌、危岩等不良地质现象和不利埋藏物。



图1 隧道实景

1.2 地层岩性

根据地勘报告及设计图纸,该段落范围内揭露地层自上而下:1)碎石土;2)中风化砂岩。碎石土密实,饱和,该层工程性质较好;中风化砂岩岩芯以块状为主,含碎块及短柱状结构,石英-长石质粉细粒结构,层理清晰且铁质浸染明显,裂隙间距为8~12 cm,锤击测试显示高脆性特征,属IV级较硬破碎岩体。

1.3 水文地质

隧道围岩稳定性不足,施工期易出现塌方及边墙变形,雨季存在渗水风险。

2 数值计算模型构建

2.1 基本假设

基于Midas/NX平台构建有限元模型,系统模

拟隧道开挖过程中超前小导管支护参数变化规律。在模型构建过程中,数值建模基于以下工程假设:1)将岩土介质简化为各向同性的弹塑性连续体,采用 Mohr-Coulomb 强度准则表征其力学特性;2)计算模型中仅计入初期支护结构的承载贡献,二次衬砌作为安全冗余度考量因素不予模拟;3)暂不考虑地下水渗流对围岩稳定性的影响。

2.2 模型建立

以左线 ZK1 + 765 - ZK1 + 865 为开挖实例, 模型建立严格遵循实际工程条件, 模型边界条件设定: 底部全约束, 四周施加法向位移约束, 顶部为自由边界以模拟地表自由沉降。根据经验法则: 模型边界距离研究区域的长度不小于 3 ~ 5 倍开挖尺寸 (如洞径、开挖跨度)。经过充分论证, 模型几何尺寸横向取 100 m, 纵向取 80 m, 竖向自拱顶至地表取 65 m, 确保边界效应不影响开挖区的应力分布。

2.3 模型参数设置

隧道断面按设计图纸采用标准三心圆拱形,并考虑超前小导管注浆的预加固效果。在材料参数设置方面,初期支护采用多单元耦合模拟方法:采用实体单元模拟 250 mm 厚喷射混凝土层,锚杆系统选用 cable 单元进行建模,按 1.2 m × 1.2 m 间距呈梅花形布置;钢拱架选用 beam 单元模拟 18 号工字钢的力学行为。围岩采用弹塑性本构模型,衬砌结构简化为线弹性模型,所有材料参数均依据地质勘察报告和《公路隧道设计规范》(JTG D70)确定。模型网格划分经过严格把控,并在支护结构区域进行局部加密,确保计算精度。超前支护系统在拱顶 120°范围内设置小导管,以准确反映实际工程的预加固效果。该数值模型综合考虑了工程地质条件、施工工法和支护结构的协同作用,为后续参数优化研究提供了可靠的数值分析平台。数值模型如图 2 所示、模型力学参数如表 1 所示。

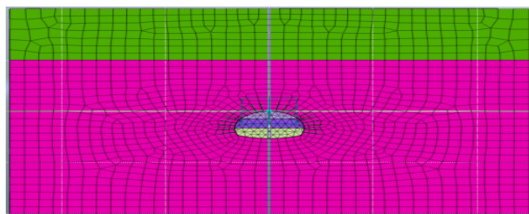


图2 数值模型

表 1 模型力学参数

材料 类型	弹性模 量/GPa	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	泊松 比	黏聚 力/kPa	内摩擦 角/($^{\circ}$)
碎石土	0.06	1 700	0.33	0.05	18
砂岩	0.15	2 100	0.30	0.10	24
注浆加固区	2.20	2 000	0.30	180.00	30
注浆小导管	115.00	7 850	0.30	—	—
锚杆	210.00	7 850	0.30	—	—
喷混	31.00	2 300	0.30	—	—

2.4 小导管布设

综合国内外研究成果及典型工程案例,主要针对小导管长度、环向间距、直径、外插角、加固区厚度进行数值计算分析,通过控制变量法,系统考察小导管长度 3.5~5.5 m (3.5、4、4.5、5、5.5 m)、倾角 $6^{\circ} \sim 15^{\circ}$ (6° 、 8° 、 10° 、 12° 、 15°) 及直径 $\varnothing 32 \text{ mm} \sim \varnothing 62 \text{ mm}$ ($\varnothing 32 \text{ mm}$ 、 $\varnothing 42 \text{ mm}$ 、 $\varnothing 52 \text{ mm}$ 、 $\varnothing 62 \text{ mm}$) 等参数的影响规律。环向间距为 0.2、0.3、0.4、0.5、0.6 m; 注浆加固区为 1.5、2.0、2.5、3.0、3.5 m 等参数通过数值进行模拟,提出优化布置建议。小导管布设如图 3 所示。其中, L_1 为钢管长度; r_1 为半径 1; r_2 为半径 2。

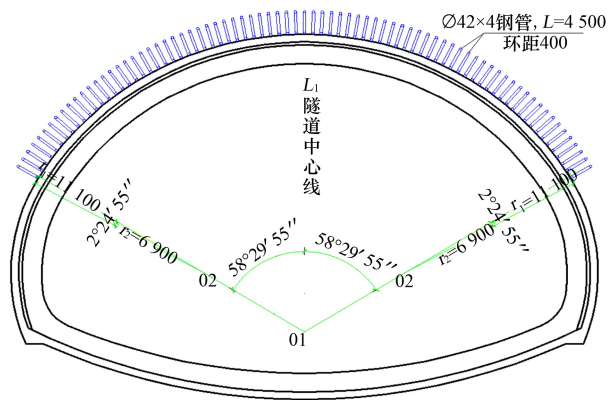


图3 小导管布设示意

2.5 监测断面及点位布设方案

在隧道开挖过程中,沿掘进方向于穿越层布设两组监测断面,每组断面分别设置拱顶和仰拱监测点位。通过监测各断面围岩变形及支护结构受力状态,对比分析不同位置预加固措施的支护效果。基于实测数据与数值模拟结果的对比研究,重点探讨超前小导管注浆预加固技术的优化方案,旨在确定该预加固措施的最佳设计参数与施工工艺。研究结果可为类似地质条件下的隧道工程预

加固设计提供理论依据和技术参考。

3 参数设置模拟结果分析

3.1 小导管长度

采用控制变量法,在固定其他影响因素的前提下,模拟 3.5、4.0、4.5、5.0、5.5 m 这 5 种不同导管长度工况下的围岩变形特征(小导管环向间距 0.4 m、直径 42 mm、外插角 10°、加固区厚度 2.5 m 参数不变)。通过对比分析各工况的竖向位移(选取小导管长度 4.5 m 最优工况作为代表)及位移监测数据,揭示小导管长度与围岩变形控制的量化关系。

3.1.1 小导管长度参数与变形控制效果的相关性

最优工况竖向位移云图如图 4 所示,小导管长度变化对围岩位移的影响如图 5 所示。最优工况为围岩位移变化趋于平缓的拐点位置,从图 5 可以看出 4.5 m 位置最优。模拟数据结果表明,随着小导管长度的增加,围岩变形呈现显著递减趋势。具体表现:当导管长度由 3.5 m 增至 5.5 m 时,拱顶沉降降低 13.5%,仰拱隆起位移减少 10.5%。这一规律在图 5 中得到进一步验证:相较于 3.5 m 基准值,4~5.5 m 工况的拱顶沉降降幅达 3.2%~13.5%,仰拱隆起降幅达 2.9%~10.5%。数据证实,适当增加导管长度可有效改善围岩稳定性。

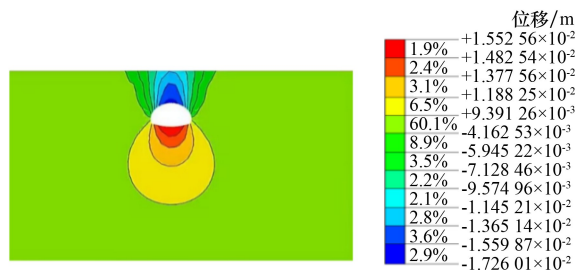


图 4 小导管长度为 4.5 m 的竖向位移云图

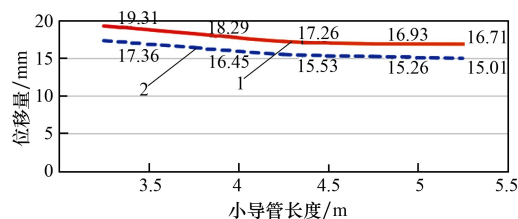


图 5 小导管长度变化对围岩位移的影响

3.1.2 支护效果的边际递减特性

数据结果表明,支护效果与小导管长度存在

明显的非线性关系。当导管长度超过 4.5 m 临界值后,继续增加导管长度所产生的变形控制增益显著降低。具体表现:导管长度从 4.5 m 增至 5.5 m 时,拱顶沉降仅额外改善 3.2%,仰拱隆起仅降低 2.9%。这种边际效应递减现象表明,单纯增加小导管长度并不能有效提升支护体系的整体性能,过长的导管并不能带来相应工程效益的提升。

3.2 小导管环形间距

为探究小导管环向间距对围岩变形的影响作用,固定其余参数(小导管长度 4.5 m、直径 42 mm、外插角 10°、加固区厚度 2.5 m 参数不变),设置 0.2、0.3、0.4、0.5、0.6 m 这 5 种间距工况开展对比研究,最优工况竖向位移云图如图 6 所示。模拟结果表明,随着小导管环向间距的增大,围岩位移显著增加。不同环向间距与围岩位移变化如图 7 所示。由图 7 可知,当环向间距从 0.2 m 增至 0.6 m 时,拱顶沉降增幅达 14.4%,仰拱隆起增幅为 15.8%,说明减小环向间距可有效抑制围岩变形。进一步分析图 7 数据可知,与 0.6 m 工况相比,环向间距为 0.5、0.4、0.3 m 及 0.2 m 时,拱顶沉降分别降低 4.8%、9.7%、12.2% 及 13.5%,仰拱隆起则相应减少 5.6%、11.3%、14.5% 及 15.8%。这表明减小环向间距能够显著提升超前支护效果,但位移降幅随间距减小呈现递减趋势,说明过密的布置可能带来边际效益下降。

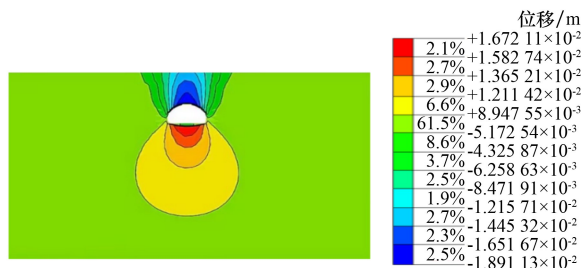


图 6 小导管环向间距为 0.4 m 的竖向位移云图

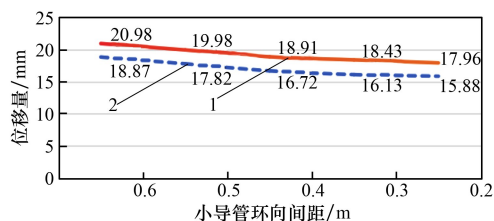


图 7 不同小导管环向间距对围岩位移的影响

尽管减小环向间距可增强支护效果,但会带来以下问题:1) 施工难度增加:注浆加固区厚度不变时,小导管数量随间距减小呈倍数增长,导致施工复杂度提高;2) 材料成本上升:导管用量增加直接提升工程成本;3) 效率降低:密集布管可能影响其他工序的施工进度。反之,过大的环向间距会导致支护效应弱化,增大围岩失稳风险。

3.3 小导管直径

采用控制变量法,保持其他参数不变,选取 32、42、52、62 mm 这 4 种直径工况进行对比分析(小导管环向间距 0.4 m、长度 4.5 m、外插角 10°、加固区厚度 2.5 m 参数不变)。

最优工况竖向位移云图如图 8 所示,小导管直径对围岩位移的影响曲线如图 9 所示。最优工况为围岩位移变化趋于平缓的拐点位置。从图 9 可以看出,直径为 42 mm 最优,增大导管直径可有效抑制围岩变形。当直径由 32 mm 增至 62 mm 时,拱顶沉降减少 13.4%,而仰拱隆起降低 13.1%。这说明增大直径对控制拱顶沉降有效果。

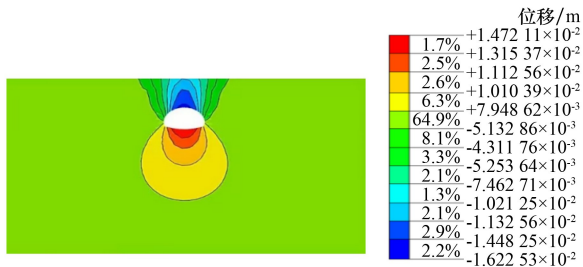
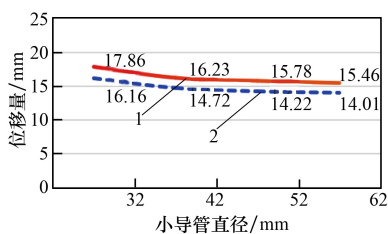


图 8 小管径为 42 mm 的竖向位移云图



1—拱顶沉降; 2—仰拱隆起。

图 9 不同小导管直径对围岩位移的影响

进一步分析图 9 可知,与 32 mm 直径相比,采用 42、52、62 mm 小导管时,拱顶沉降分别降低 9.1%、11.6% 和 12.1%,仰拱隆起降幅则达到 8.9%、9.1% 和 10.1%。由此可知,虽然增大直径能持续减小位移,但直径超过 42 mm 后,位移降幅趋于平缓,边际效益显著降低。

当导管直径过小时,支护刚度不足,难以有

效约束围岩变形,直径过大时,位移控制效果提升有限,却会带来以下问题:需消耗更多钢材,钻孔、安装等工序要求更高精度与设备能力。

3.4 小导管外插角

采用控制变量法,通过设置 6°、8°、10°、12°、15°这 5 种外插角度工况,分析小导管外插角度对隧道围岩变形特性的影响规律。

3.4.1 小导管外插角度对围岩变形的影响机制

最优工况竖向位移云图如图 10 所示,不同导管外插角及对围岩位移的影响曲线如图 11 所示。小导管外插角度与围岩变形呈现一定的相关性。由图 11 可知,当外插角度由 6°增大至 15°时,拱顶沉降降幅达 13.7%,仰拱隆起降幅达 11.6%。这一现象可归因于以下力学机理,随着外插角度增大,超前支护形成的“预拱效应”减弱;插入角度不同的施工,导致支护结构上方的三角形松散区范围扩大,增大了围岩荷载;支护结构的竖向分力减小,削弱了对围岩变形的约束能力。

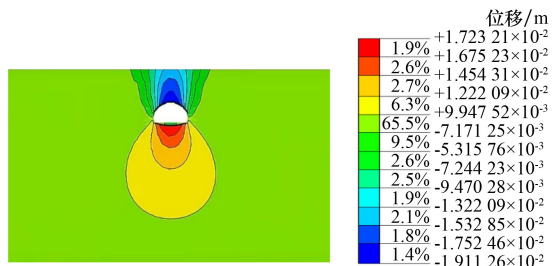
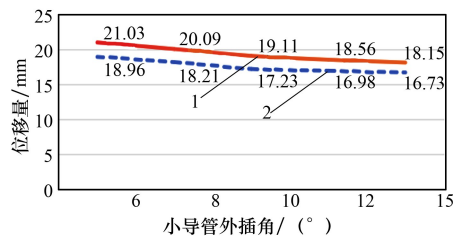


图 10 小导管插入角度为 10°的竖向位移云图



1—拱顶沉降; 2—仰拱隆起。

图 11 不同导管外插角度对围岩位移的影响

3.4.2 支护效果分析

图 11 的对比数据显示,与 6°基准工况相比:拱顶沉降降幅依次为 4.5% (8°)、9.1% (10°)、11.1% (12°) 和 12.1% (15°),仰拱隆起降幅分别为 4.1% (8°)、9.1% (10°)、10.4% (12°) 和 11.8% (15°)。由此可知,外插角度在 6°~15°范围内变化时,支护效果均有变化;当角度超过 10°后,支护效能趋势趋于平缓。

3.5 注浆加固区厚度

采用控制变量法,通过设置 1.5、2.0、2.5、3.0、3.5 m 这 5 种注浆加固区厚度工况,分析其对隧道围岩变形特性的影响规律。

3.5.1 加固区厚度与围岩变形的相关性

最优工况竖向位移云图如图 12 所示,注浆加固区厚度对围岩位移的影响曲线如图 13 所示。由图 13 可知,注浆加固区厚度与围岩变形呈现显著的负相关性,当加固区厚度由 1.5 m 增至 3.5 m 时,拱顶沉降降低 18.5%,仰拱隆起减少 16.8%。这一现象主要源于以下力学机理:加固区厚度增加显著增强了土拱效应,改善了荷载传递路径;加固体形成的承载环刚度提高,有效分担了围岩压力;注浆体对围岩的改良范围扩大,提高了整体稳定性。

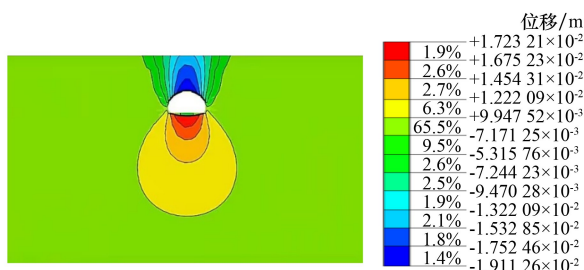
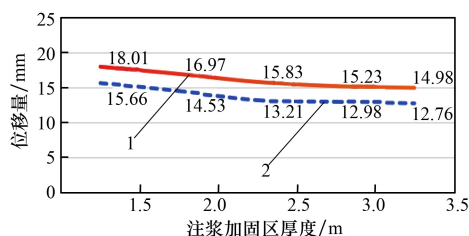


图 12 注浆加固区 2.5 m 的位移的竖向位移云图



1—拱顶沉降; 2—仰拱隆起。

图 13 注浆加固区厚度对围岩位移的影响

3.5.2 支护效果分析

图 13 的对比数据显示,与 1.5 m 基准工况相比:拱顶沉降降幅依次为 5.8% (2 m)、12.5% (2.5 m)、15.4% (3 m) 和 15.8% (3.5 m);仰拱隆起降幅分别为 7.2% (2 m)、15.6% (2.5 m)、17.1% (3 m) 和 18.1% (3.5 m)。数据表明:当厚度超过 2.5 m 后,变形控制效果提升幅度明显减弱。

3.6 小导管支护设计参数确定

3.6.1 参数优化方法

基于围岩变形控制机理与工程经济性分析,采用多因素综合评价法,对深汕区某市政道路单

洞四车道隧道超前支护系统进行参数优化分析。通过支护参数—围岩变形—施工成本的量化关系,确定最优参数组合。

3.6.2 优化参数建议

(1) 参数配置:注浆加固范围 2.5 m (有效松动区);超前小导管长度 4.5 m (满足超前支护要求);外插角度布设为 10° (最佳支护角度)。

(2) 结构布置参数:环向布设间距 0.4 m (经济最优间距);超前小导管规格 42 mm (刚度满足要求)。

4 支护效果评价

4.1 围岩变形演化特征

基于 ZK1 + 765 - ZK1 + 940 断面的监测数据如图 14、15 所示,围岩变形呈现典型的时序演化规律。变形发展阶段快速增长期为 0 ~ 10 d,缓慢增长期为 10 ~ 30 d,稳定收敛期为 30 d 后。变形机制初期变形主要由开挖卸荷效应引起,随着初期支护施作,变形速率显著降低。监测后期出现的微小波动与施工机械化施工振动荷载相关,属正常施工扰动范围。

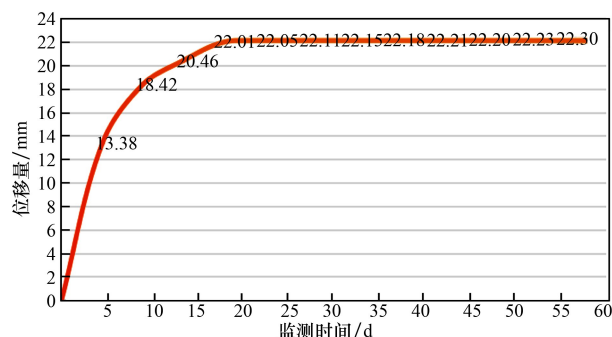


图 14 监测断面现场实测位移曲线的分布特征 (拱顶)

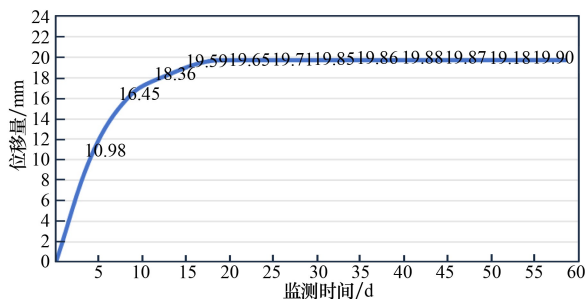


图 15 监测断面现场实测位移曲线的分布特征 (仰拱)

4.2 支护效果验证

现场监测数据显示最终变形量拱顶沉降 22.3 mm (小于设计标准);仰拱隆起 19.9 mm (小于设计标准),满足《公路隧道施工技术规范》(JTG/T 3660—

2020)的要求。

4.3 参数优化合理性论证

变形控制效果实测最大变形量仅为允许值的约 80%，证明 2.5 m 注浆厚度与 0.4 m 环距的参数组合有效抑制了围岩塑性区发展。

时效性验证 30 d 后基本达到稳定状态，反映了 10°外插角与 4.5 m 导管长度参数实现了快速支护。

5 结 论

(1) 注浆加固区厚度对围岩位移控制存在最优区间。当厚度由基准值增至 3 m 时，围岩位移降低 16.3%；继续增至 3.5 m 时，位移降幅仅提高 1.3%，但施工成本上升约 15%。综合控制效果与经济性，建议本项目采用 2.5 m 的注浆加固厚度。

(2) 小导管长度与直径对位移控制呈非线性影响特征。长度达到 4.5 m 即可穿越松动区，增至 5.5 m 时位移控制效果提升不足 5%。直径 42 mm 时为刚度与材料用量的最佳平衡点；增大至 52 mm 会导致材料成本增加约 20.1%，而位移控制效果仅提升 3%。

(3) 小导管外插角为 10°时可形成最优支护拱效应，增至 15°将引起位移增加约 2%。环向间距 0.4 m 为临界值，超过该值时位移增长率显著上升；过小间距虽能提升支护效果，但会加大施工难度。

(4) 隧道围岩变形呈现三阶段发展特征，30 d 后变形速率稳定在 0.1 mm/d 以下。最终拱顶沉降 22.3 mm，仰拱隆起 19.9 mm，均满足控制标准。实测数据与数值模拟结果吻合良好，位移量误差小于 10%，稳定时间预测偏差在 5 d 以内，验证了参数设计的合理性与数值模型的可靠性。

参考文献:

[1] 洪开荣,冯欢欢.中国公路隧道近 10 年的发展趋势与思考[J].中国公路学报,2020,33(12):62-76.

- [2] 王婧,杨双锁,赵景阳,等.基于正交试验的地铁隧道超前小导管参数优化研究[J].建筑技术,2017,48(11):1167-1170.
- [3] 王东剑.隧道穿越断层带围岩超前小导管预加固措施参数研究[J].公路,2022,67(6):395-400.
- [4] 李金奎,任恒.城市地下通道交叉中墙法超前支护小导管[J].城市轨道交通研究,2023,26(7):76-81.
- [5] 陈光友,王占宇,陈健,等.基于组合赋权的白云岩隧道超前支护综合评价[J].中国农村水利水电,2024,26(11):233-239;246.
- [6] 陈家征,马述起.铁路隧道穿越富水断层破碎带注浆形式与注浆圈参数优化[J].科学技术与工程,2025,25(10):4334-4346.
- [7] 夏曾银,章慧健,陈军,等.膨胀型泥岩隧道的支护力学特性及对策:以内蒙古某隧道为例[J].科学技术与工程,2025,25(12):5164-5172.
- [8] 魏晓波.水平层状岩隧道支护参数优化设计与数值模拟[J].铁道建筑,2025,65(2):101-106.
- [9] 谢壁婷,肖明清,徐晨,等.基于总安全系数法的宜兴高速铁路隧道支护参数优化与试验[J].铁道建筑,2024,64(1):86-89.
- [10] 杨晓华,赵滨京,吴昊,等.千枚岩深埋隧道支护参数对结构受力与变形的影响[J].建筑科学与工程学报,2020,37(3):108-117.
- [11] 张佳华,张标.非线性破坏准则下浅埋隧道支护参数上限解[J].铁道科学与工程学报,2018,15(8):2062-2071.
- [12] 资晓鱼,申玉生,朱双燕,等.层状千枚岩隧道形变破坏规律与支护措施研究[J].现代隧道技术,2021,58(3):196-204.
- [13] 安永林,周进,欧阳鹏博,等.超前支护隧道掌子面的稳定性分析[J].中南大学学报(英文版),2021,28(2):604-617.
- [14] 邓祥辉,刘锦涛,王睿.浅埋卵石土层隧道超前支护措施研究[J].公路交通科技,2023,40(1):136-143.