

DOI: 10.7672/sgjs2026070065

浅埋软岩隧道洞口段双层小导管作用效果研究*

邹瑜¹, 谭可¹, 傅鹤林², 彭泽同²

(1. 中建五局土木公司市政环保分公司, 湖南 长沙 410004; 2. 中南大学土木工程学院, 湖南 长沙 410075)

[摘要] 为探究浅埋软岩隧道洞口双层超前小导管支护效果并确定最优支护参数方案,以紫金山2号隧道为依托,基于地质勘察报告和施工组织设计,建立数值计算模型。考虑小导管搭接长度、小导管外插角以及小导管注浆厚度和布置范围4因素设置施工工况,从拱顶沉降、水平收敛和小导管所受弯矩等多个角度对比不同工况下浅埋软岩隧道洞口段双层小导管支护作用效果,并结合现场监测数据进行验证。研究表明:采用双层小导管支护,隧道开挖施工围岩变形控制效果更好,最大拱顶沉降幅度降低约39%,最大水平收敛降低幅度约8%;相较于无搭接情况(沉降约6.735mm),双层小导管搭接后拱顶沉降显著降低,但当搭接长度超过1.0m后,沉降减幅趋缓;双层小导管内层、外层内插角的改变对隧道拱顶沉降以及水平收敛的影响并不明显;拱顶沉降、水平收敛随注浆厚度和范围增大而减小,最优参数为注浆厚度 $t=1.5\text{m}$ 、布置范围 $\alpha=120^\circ$;实测数据与数值模拟结果具有较好的吻合度。

[关键词] 隧道;软岩;双层小导管;支护;数值模拟;监测

[中图分类号] U457.2

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2026)07-0065-07

Study on the Effect of Double-layer Small Conduit Support at the Portal Section of Shallow-buried Soft Rock Tunnel

ZOU Yu¹, TAN Ke¹, FU Helin², PENG Zetong²

(1. Municipal Environmental Protection Branch, CCFED Civil Engineering Co., Ltd., Changsha, Hunan 410004, China;

2. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha, Hunan 410075, China)

Abstract: To investigate the support effect of double-layer small conduit at the portal section of shallow-buried soft rock tunnel and determine the optimal support parameter configuration, based on the No. 2 tunnel of Zijing Mountain, a numerical model was established using geological survey reports and construction organization design. The model considers four key factors: the overlap length of the small pipes, the insertion angle combination of the small pipes, the grout thickness, and the arrangement range. Various construction conditions were simulated, and the support effect of the double-layered small pipes was compared from multiple perspectives, including the crown settlement, horizontal convergence, and bending moment of the advanced small pipes. The results were verified with field monitoring data. The findings indicate that the use of double-layer small conduit support significantly improves the control of surrounding rock deformation during tunnel excavation, with the maximum crown settlement reduced by approximately 39% and the maximum horizontal convergence reduced by approximately 8%. Compared to no overlap (with a settlement of about 6.735mm), the crown settlement is notably reduced with double-layer small conduit overlap. However, when the overlap length exceeds 1.0m, the reduction in settlement becomes less significant. The change in the insertion angles of the inner and outer layers of the double-layer small conduit has minimal effect on the crown settlement and horizontal convergence of the tunnel. The crown settlement and horizontal convergence decrease as the grouting thickness and arrangement range increase, and the optimal parameters are $t=1.5\text{m}$ and $\alpha=120^\circ$. The measured data

* 国家自然科学基金(52478424);湖南省教育厅重点项目(23A0014);中建五局科研课题:软弱富水破碎围岩特长隧道群低碳智能绿色建造关键技术研究(0201202200519014)

[作者简介] 邹瑜,高级工程师,E-mail: 466086855@qq.com

[通信作者] 傅鹤林,教授,博士生导师,E-mail: 1798400570@qq.com

[收稿日期] 2025-09-20

show good agreement with the numerical simulation results.

Keywords: tunnels; soft rock; double-layer small conduit; supports; simulation; monitoring

0 引言

随着我国交通基础设施建设的快速推进,隧道工程在复杂地质条件下的应用日益增多。浅埋软岩隧道由于围岩强度较低且自稳能力差,施工过程中常面临围岩变形大、支护结构受力复杂等一系列难题。尤其在洞口段,地层扰动较为明显,容易引发坍塌和沉降等灾害^[1-5]。传统的超前支护方法虽然能够在一定程度上应对这些问题,但在控制围岩变形和优化施工成本方面仍存在一定的局限性。与传统方法相比,双层注浆小导管支护在提高岩体稳定性、优化施工工艺、减少钢材使用和缩短施工周期等方面展现出更为显著的优势^[6-7]。

杨坚^[8]通过对比长管棚、单层及双层注浆小导管超前支护技术特性,结合包西铁路新寺则河隧道工程实例,验证了双层小导管在软弱围岩隧道中的技术优势,并总结其施工工艺与设计参数;陈溪^[9]从理论分析和数值模拟两方面分析了双层小导管超前支护技术在软岩隧道洞口段的支护效果;杨辉等^[10]针对桐梓隧道下穿公路难题,采用管棚与双层小导管综合加固,有效控制了复杂地形隧道洞口的沉降值;张广乾等^[11]结合实际工程总结了双层注浆小导管超前支护的施工要点,并与其他支护方式进行对比分析;傅翼等^[12]依托杭州紫之隧道工程,通过 Plaxis 3D 模拟对比支护方案,验证双层小导管结合全断面注浆有效控制土体变形;张忠^[13]采用现场试验和数值模拟两种方法研究了不同超前支护措施下浅埋黄土隧道的应力变形情况;范洪海^[14]结合马来西亚 Timah Tasoh 隧道工程,利用 FLAC3D 模拟对比管棚与双排小导管支护效果,结果表明双排小导管兼具施工便捷与成本优势,安全可控性更佳;赵志有等^[15]依托郑州地铁工程,以双层注浆小导管替代管棚并优化开挖方案,沉降控制达标,验证其在黏质粉土地层的支护优势。学者们对不同超前支护方法从多维度进行了研究,具有丰富的研究成果,但在浅埋软岩隧道洞口段双层小导管支护效果方面还存在不足。

本文基于紫金山 2 号隧道的地质水文条件、建设状况及施工组织设计等相关资料,通过数值模拟与现场监测相结合的方法,分析了双层小导管搭接长度、外插角、注浆厚度及范围等关键参数对围岩变形控制的影响规律,最终确定了本工程最优双层小导管支护方案,以期对类似工程有借鉴作用。

1 工程概况

1.1 项目概况

紫金山 2 号隧道为分离式特长隧道,左线隧道起于 Z2K33+235,终于 Z2K37+538,隧道底设计高程为 427.250~500.680m,隧道限界宽 10.75m,高 5.0m,全长 4 303m;右线隧道起于 K33+241,终于 K37+543,隧道底设计高程为 427.250~500.720m,隧道宽 11.00m,高 6.0m,全长 4 302m。隧道采用双向施工,从两端进洞对向开挖。紫金山 2 号洞口位置如图 1 所示,隧道出口邻近 G207 国道,与国道水平投影距离为 65m,隧底标高高于国道约 28m,隧道口与国道之间有一条河道直线穿过。洞口地质条件一般,围岩等级为 V 级。



图 1 隧道洞口位置

Fig. 1 Location of tunnel entrance

1.2 工程地质条件

为得出两种支护方案下围岩应力和变形情况,选取紫金山 2 号隧道洞口段 ZK37+454—ZK37+534 进行分析,如图 2 所示。该施工段长 80m,顶板平均埋深仅 9m。该段围岩以钙泥质砂岩与砂质泥岩互层为主,中夹砂岩和石英砂岩,中厚层状夹薄层状。强风化层属板状软岩类,节理发育,岩体破碎,呈块状夹碎块状,夹泥;中风化层属软岩类,节理发育,隙面见浸染,岩体较破碎,岩芯多以短柱状、块状为主。局部围岩为微风化岩,属较软岩,节理较发育,岩体较完整,多呈柱状、短柱状、饼状夹块状。隧道区受区域构造影响,小型、次级小断层普遍发育,层间错动明显,隧道开挖后可能产生较大的坍塌和掉块。

1.3 设计参数

根据地质勘察报告以及 JTG 3370.1—2018《公路隧道设计规范 第一册 土建工程》选取适当围岩和支护参数,取值具体如表 1 所示。隧道采用超前注浆支护方案,注浆加固后的围岩区域以提高土体力学参数进行取值。根据施工方案选取适当支护

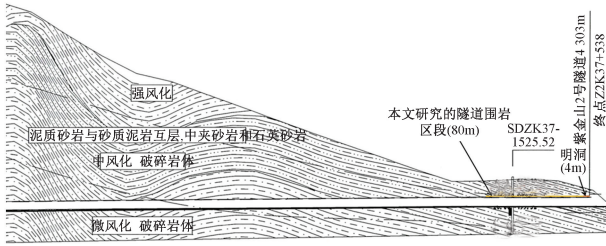


图 2 隧道左洞地质纵断面

Fig. 2 Geological longitudinal section of the left tunnel

参数,其中钢筋混凝土材料按 3% 配筋率计算其折算弹性模量和重度,具体支护参数取值如表 2 所示。

2 数值计算模型

2.1 支护方案

隧道洞口段采用环形开挖预留核心土法进行施工支护设计。锚杆采用 D25 中空注浆锚杆 $L=3.5\text{m}$, 0.6m (纵) $\times 1.0\text{m}$ (环);喷射混凝土采用 26cm 厚 C25 混凝土;二衬采用 50cm 厚 C35 混凝土。超前支护采用 $D=42\text{mm}$, $t=3.5\text{mm}$ 双排小导管,外层小导管长度 $L_1=4.5\text{m}$,内层小导管长度 $L_2=3.5\text{m}$,搭接长度 1.5m,外层小导管外插角度 $\theta_1=30^\circ$,内层小导管外插角度 $\theta_2=10^\circ$,环向间距 40cm,内外层小导管间距为 30cm。超前小导管注浆和超前双层小导管的小倾角钢管注浆采用水泥单液浆,研究断面选择 ZK37+494。

2.2 模型尺寸及边界

考虑隧道开挖区域以及对周围土体的影响,模型尺寸竖向取 60mm,横向取 70m (>5 倍洞径),纵向取 70m (为减小纵向边界效应),隧道取 ZK37+454—ZK37+534 段区域,总长 80m,隧道整体模型如图 3 所示,隧道支护如图 4 所示。为探究支护方案支护效果,两施工方案除超前支护外不存在其他

差异。

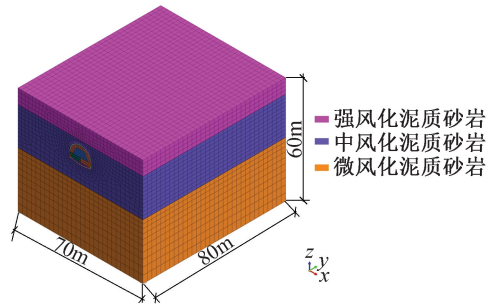


图 3 隧道整体模型

Fig. 3 Overall excavation model

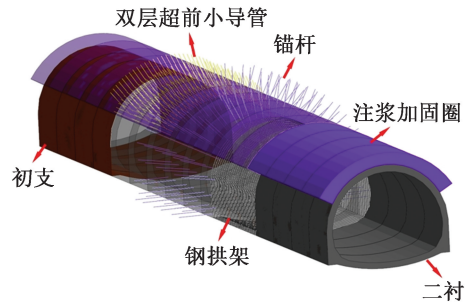


图 4 隧道支护

Fig. 4 Tunnel support

计算模型对应的边界条件为:上表面为自由表面,模拟地表无约束情况;左右以及前后表面为法向约束,底部边界为固定约束,不考虑模型尺寸范围外土体对计算结果的影响。

3 双层小导管支护效果分析

模拟采用改变地层围岩参数的方式模拟超前加固效果影响,通过网格划分和施工步设置模拟不同开挖方案。双层超前小导管支护模拟施工程序为:双层小导管→注浆影响范围土体参数改变→土

表 1 土体材料参数

Table 1 Soil material parameters

编号	土层类别	单元类型	本构模型	弹性模量/kPa	泊松比	重度/($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	黏聚力/kPa	内摩擦角/($^\circ$)
1	强风化泥质砂岩	实体单元	MC	400 000	0.30	18	20	25
2	中风化泥质砂岩	实体单元	MC	50 000	0.30	20	18	35
3	微风化泥质砂岩	实体单元	MC	50 000	0.30	20	18	35
4	注浆加固圈	实体单元	MC	1 000 000	0.35	21	200	45

表 2 支护材料参数

Table 2 Support material parameters

编号	构件	材料	本构模型	单元类型	弹性模量/kPa	泊松比	重度/($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)
1	初支	C25 钢筋混凝土	弹性	2D 板单元	3.15×10^7	0.2	23.7
2	锚杆	钢材	弹性	1D 植入式桁架	2.10×10^8	0.3	78.5
3	超前小导管	钢材	弹性	1D 植入式梁单元	1.27×10^8	0.3	78.5
4	钢拱架	钢材	弹性	1D 植入式梁单元	2.10×10^8	0.3	78.5
5	二衬	C35 钢筋混凝土	弹性	3D 实体单元	3.69×10^7	0.2	24.7

体开挖→锚杆激活→初喷激活→二衬施作,通过施工阶段模拟分析双层小导管支护效果。

根据《公路隧道设计规范 第一册 土建工程》的相关规定,如表 3 所示,隧道的荷载释放比例选择如下:围岩与初期支护占 30%,二次衬砌占 70%。

表 3 释放荷载分担比例
Table 3 Load sharing ratio

围岩级别	分担比例/%	
	围岩+初期支护	二次衬砌
IV	60~80	40~20
V	20~40	80~60

3.1 小导管参数分析

本项目在双层小导管截面型号已确定情况下,选择搭接长度和外插角两个重要参数进行研究。搭接长度直接影响导管之间的连接性和支护结构的整体稳定性,而外插角则关系到导管与土体的接触效果及力学性能,因此选择这两种参数进行研究具有重要意义。

3.1.1 搭接长度分析

在模型尺寸以及其他材料参数条件不变情况下,对无超前支护、无搭接长度、搭接长度 $l_1 = 1.0\text{m}$, $l_2 = 1.5\text{m}$, $l_3 = 2.0\text{m}$ 5 种工况进行模拟计算,探究双层小导管的支护效果以及不同搭接长度下隧道拱顶沉降、导管所受弯矩变化规律。隧道开挖完成后,断面处工况 1(无超前支护)与工况 4(搭接长度 $l_2 = 1.5\text{m}$)围岩竖向位移云图如图 5 及图 6 所示。

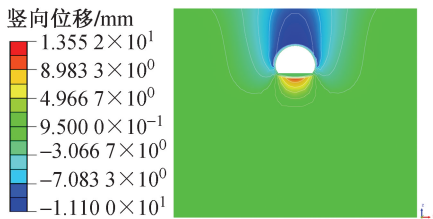


图 5 工况 1 竖向位移

Fig. 5 Vertical displacement under working condition 1

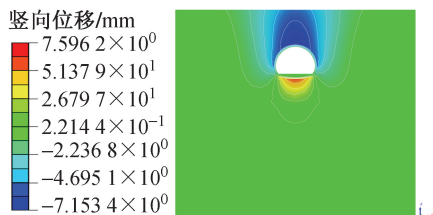


图 6 工况 4 竖向位移

Fig. 6 Vertical displacement under working condition 4

由图 5,6 可知,研究断面处隧道无超前支护竖向沉降位移最大值为 11.1mm,在双层超前小导管支护搭接长度 1.5m 工况下竖向沉降位移最大值为

7.2mm。在施作双层超前小导管支护之后最大竖向位移降低 35.14%,说明施作双层小导管超前支护可显著降低围岩竖向位移,通过导管注浆提高围岩黏聚力和内摩擦角,能有效抑制开挖卸荷引起的竖向沉降。

提取 5 种工况下隧道研究断面处拱顶的最终沉降值以及小导管最大弯矩值,结果如表 4 所示。

表 4 研究断面隧道变形及导管最大弯矩值
Table 4 Tunnel deformation and maximum bending moment of the conduit in the study section

模拟工况	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4	工况 5
搭接长度 l/m	无加固	0	1.0	1.5	2.0
拱顶沉降 z/mm	9.643	6.735	6.108	5.876	5.794
水平收敛 x/mm	4.337	4.024	3.958	3.942	3.937
弯矩 $M/(\text{N} \cdot \text{m})$	—	31.46	27.57	26.24	26.08

由表 4 可知,无超前加固、无搭接长度、搭接长度 $l = 1.0\text{m}$ 、搭接长度 $l = 1.5\text{m}$ 、搭接长度 $l = 2.0\text{m}$ 时,研究断面隧道拱顶沉降最大值分别为 9.643, 6.735, 6.108, 5.876, 5.794mm,拱顶沉降降低幅度依次为 30.16%, 9.31%, 3.80%, 1.40%;相较于工况 2 无搭接长度,工况 3 设置搭接长度 $l = 1.0\text{m}$ 后拱顶沉降降低 9.31%,这表明设置一定搭接长度有利于减小隧道拱顶沉降。然而,当搭接长度超过 1.0m 后,隧道拱顶沉降的减少幅度明显趋于平缓,降幅已不再显著,这说明搭接长度不是越长越好,实际设计时需要综合考虑工程的具体情况。此外,相较于无搭接长度,设置一定搭接长度对隧道水平收敛和小导管所受弯矩有一定改善,但搭接长度的变化对这两项指标的影响相对较小。综合考虑施工经济性与施工难度,本工程最优双层小导管搭接长度取 $l = 1.0\text{m}$ 。

3.1.2 外插角分析

在模型尺寸以及其他材料参数条件不变情况下,搭接长度取 1.0m,选择内层小导管外插角分别为 $10^\circ, 12^\circ, 14^\circ$,外层小导管外插角分别为 $25^\circ, 30^\circ, 35^\circ$,总共 9 种工况进行计算。提取 9 种工况下隧道研究断面处拱顶的最终沉降值以及小导管最大弯矩值,结果如表 5 所示。

由表 5 可知,不同工况下,拱顶沉降和弯矩的变化趋势均较为平稳,这说明外插角变化对隧道拱顶沉降和小导管所受弯矩影响较小。内层小导管外插角 $\theta_1 = 14^\circ$ 、外层 $\theta_2 = 30^\circ$ (工况 8)时,拱顶沉降为 5.873mm,小导管所受弯矩为 25.47N·m,该组合在降低沉降和减少弯矩方面相对其他几种工况均表现最优,因此选择内层小导管外插角 $\theta_1 = 14^\circ$ 、外层

表 5 研究断面拱顶沉降及导管最大弯矩值

Table 5 Vault settlement and maximum bending moment of the conduit in the study section

工况	内层小导管 外插角 $\theta_1/(\circ)$	外层小 导管外 插角 $\theta_2/(\circ)$	拱顶沉降 z/mm	弯矩 $M/(\text{N}\cdot\text{m})$
工况 1		25	5.882	27.68
工况 2	10	30	5.876	26.24
工况 3		35	5.884	28.12
工况 4		25	5.891	27.12
工况 5	12	30	5.885	25.86
工况 6		35	5.893	27.78
工况 7		25	5.887	26.89
工况 8	14	30	5.873	25.47
工况 9		35	5.886	26.68

小导管外插角 $\theta_2 = 30^\circ$ 作为本项目小导管外插角组合。

3.2 注浆加固圈参数分析

如图 7 所示,采用 $t = 0.5\text{m}$, $t = 1.0\text{m}$, $t = 1.5\text{m}$, $t = 2.0\text{m}$ 4 种小导管注浆厚度及 $\alpha = 90^\circ$, $\alpha = 120^\circ$, $\alpha = 150^\circ$, $\alpha = 180^\circ$ 4 种小导管布置范围,探究不同参数下双层小导管支护对浅埋隧道洞口段的位移控制效果及对中隔墙扰动情况,并以此确定最优双层小导管支护方案。

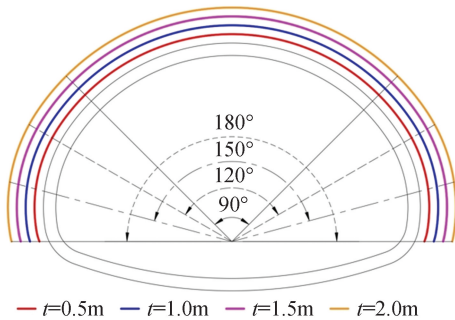


图 7 注浆加固圈工况

Fig. 7 Grouting reinforcement ring working condition

3.2.1 小导管注浆圈厚度分析

令小导管注浆范围 $\alpha = 120^\circ$, 改变注浆厚度 t , 在模型尺寸以及其他材料参数条件不变情况下,对 $t = 0.5\text{m}$, $t = 1.0\text{m}$, $t = 1.5\text{m}$, $t = 2.0\text{m}$ 4 种工况进行模拟计算,探究双层小导管在不同注浆圈厚度工况下隧道拱顶沉降、水平收敛变化规律。提取隧道拱顶不同施工步下的沉降值如图 8 所示, $t = 0.5\text{m}$, $t = 1.0\text{m}$, $t = 1.5\text{m}$, $t = 2.0\text{m}$ 时,研究断面隧道拱顶沉降最大值分别为 8.111, 7.023, 5.873, 5.223mm。支护厚度由 0.5m 增加至 2.0m, 每增加 0.5m 隧道拱顶最大沉降分别降低 13.41%, 16.37%, 11.07%。

隧道不同施工步下的水平收敛值如图 9 所示, $t = 0.5\text{m}$, $t = 1.0\text{m}$, $t = 1.5\text{m}$, $t = 2.0\text{m}$ 时,隧道水平收

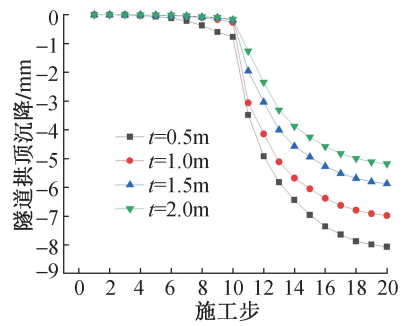


图 8 拱顶沉降(不同注浆厚度)

Fig. 8 Vault settlement (different grouting thickness)

敛最大值分别为 4.515, 4.289, 3.989, 3.830mm。支护厚度由 0 增加至 1.5m, 每增加 0.5m, 隧道最大水平收敛分别降低 5.09%, 6.99%, 4.01%。

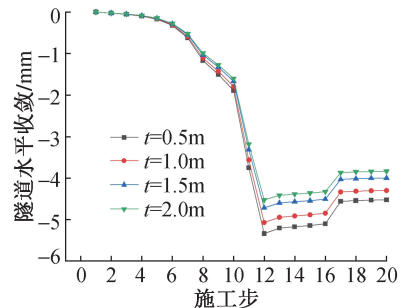


图 9 水平收敛(不同注浆厚度)

Fig. 9 Horizontal convergence (different grouting thickness)

由上述分析可知,随着小导管注浆厚度 t 增大拱顶沉降、水平收敛均表现为减小,表明小导管注浆加固能有效抑制隧道变形。注浆圈增厚对隧道水平收敛影响较小,对隧道沉降的改善效果更显著,但当注浆厚度 $t > 1.5\text{m}$ 后,继续增大厚度对改善隧道变形的效果显著减弱,边际效益下降,考虑施工经济性,本工程最优注浆圈厚度为 $t = 1.5\text{m}$ 。

3.2.2 小导管注浆圈范围分析

令小导管注浆厚度 $t = 1.5\text{m}$, 改变注浆范围 α , 在模型尺寸以及其他材料参数条件不变的情况下,对 $\alpha = 90^\circ$, $\alpha = 120^\circ$, $\alpha = 150^\circ$, $\alpha = 180^\circ$ 4 种工况进行模拟计算,探究双层小导管在不同注浆圈范围工况下隧道拱顶沉降、水平收敛变化规律。如图 10 所示,改变注浆范围 α 隧道拱顶沉降变形趋势与前文一致。 $\alpha = 90^\circ$, $\alpha = 120^\circ$, $\alpha = 150^\circ$, $\alpha = 180^\circ$ 时,隧道拱顶沉降最大值分别为 7.259, 5.873, 5.586, 5.323mm。注浆范围由 90° 增加至 180° , 每增加 30° , 隧道最大拱顶沉降分别降低 19.09%, 4.89%, 4.71%。

如图 11 所示, $\alpha = 90^\circ$, $\alpha = 120^\circ$, $\alpha = 150^\circ$, $\alpha = 180^\circ$ 时,隧道水平收敛最大值分别为 4.188, 3.989,

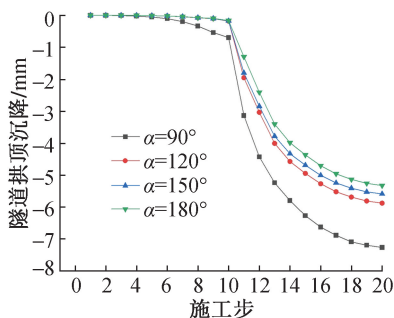


图 10 拱顶沉降(不同注浆范围)

Fig. 10 Vault settlement(different grouting range)

3.830, 3.670mm。注浆范围由 90° 增加至 180° , 每增加 30° , 隧道最大水平收敛分别降低 4.75%, 3.99%, 4.18%。

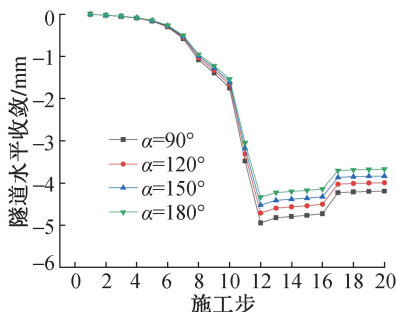


图 11 水平收敛(不同注浆范围)

Fig. 11 Horizontal convergence(different grouting range)

由上述分析可知,随着注浆范围 α 增大隧道拱顶沉降、水平收敛均表现为减小,表明小导管注浆加固能有效抑制隧道变形。注浆范围的扩展对隧道拱顶沉降的改善作用最为显著,对隧道水平收敛的影响则相对较小。但当注浆厚度 $\alpha > 120^\circ$ 后,继续增大参数对改善隧道变形的效果显著减弱,边际效益下降,考虑施工经济性,本工程最优小导管支护参数应取注浆范围 $\alpha = 120^\circ$ 。

4 讨论

4.1 最优方案

综上所述 3.1 节以及 3.2 节,设置一定搭接长度有利于减小隧道拱顶沉降,但搭接长度超过一定值后,隧道拱顶沉降的减少幅度明显趋于平缓。小导管外插角角度变化对隧道拱顶沉降和小导管所受弯矩影响较小。随双层小导管注浆厚度 t 和注浆范围 α 增大拱顶沉降、水平收敛均表现为减小,表明小导管注浆加固能有效抑制隧道变形和支护结构受力。但当注浆厚度 $t > 1.5\text{m}$ 、注浆范围 $\alpha > 120^\circ$ 后,继续增大参数对改善隧道变形和中隔墙受力的效果显著减弱。

通过参数分析,综合考虑施工经济性与施工难

度,最优双层小导管搭接长度取 $l = 1.0\text{m}$,内层小导管外插角 $\theta_1 = 14^\circ$ 、外层小导管外插角 $\theta_2 = 30^\circ$,注浆厚度 $t = 1.5\text{m}$ 、注浆范围 $\alpha = 120^\circ$ 。

4.2 监测对比

3.1.1 节工况 4 采用支护参数与紫金山隧道进行入洞口施工一致,采用全站仪监测隧道拱顶沉降情况,现场监测结果如表 6 所示,最大沉降出现在隧道拱顶位置,为 6.253mm,最大水平收敛出现在隧道拱腰位置,为 4.177mm。数值模拟计算结果与施工监测误差小于 10%,经验证,本工程采用搭接长度 $l = 1.0\text{m}$ 、内层小导管外插角 $\theta_1 = 14^\circ$ 、外层小导管外插角 $\theta_2 = 30^\circ$ 、注浆厚度 $t = 1.5\text{m}$ 、注浆范围 $\alpha = 120^\circ$ 的双层小导管支护参数能有效控制浅埋软岩隧道洞口段隧道变形。

表 6 监控量测数据对比

Table 6 Comparison of monitoring measurement data

量测类别	监控量测结果/mm	数值计算结果/mm	误差/%
拱顶沉降	6.253	5.876	6.03
水平收敛	4.177	3.942	5.63

5 结语

本文依托紫金山隧道项目展开双层小导管支护效果研究,基于紫金隧道围岩地质水文条件和施工组织设计,分别采用无超前支护和双层小导管支护两种支护方案进行施工阶段模拟,对比分析超前双层小导管支护效果,得出以下结论。

1) 采用双层小导管支护,隧道开挖施工时围岩变形扰动范围更小,围岩变形程度更低。未采用超前支护时,最大拱顶沉降为 31.1mm,最大水平收敛为 33.3mm;采用双层小导管支护时,最大拱顶沉降为 12.3mm,最大水平收敛为 14.2mm。

2) 双层小导管的搭接长度有助于减小隧道拱顶沉降,但当搭接长度超过一定值后,沉降减少幅度趋于平缓,效果不再显著。因此,搭接长度并非越长越好,设计时应结合具体工程情况综合考虑。

3) 外插角角度变化对隧道拱顶沉降和小导管所受弯矩影响较小。就本工程而言,内层小导管外插角 $\theta_1 = 14^\circ$ 、外层小导管外插角 $\theta_2 = 30^\circ$ 时,该组合在降低沉降和减少弯矩方面相对其他几种工况均表现最优。

4) 拱顶沉降、水平收敛均随注浆厚度 t 和注浆范围 α 的增大而减小,表明双层小导管支护能有效抑制浅埋软岩隧道洞口段变形和支护结构受力。但当注浆厚度 $t > 1.5\text{m}$ 、注浆范围 $\alpha > 120^\circ$ 后,继续增大参数对改善变形和应力的效果显著减弱,边际效

益下降。过大的注浆参数虽可能进一步降低变形,但会增加材料成本、施工时间及工艺复杂性。本工程最优双层小导管支护参数应取注浆厚度 $t = 1.5\text{m}$ 、注浆范围 $\alpha = 120^\circ$,此组合在保障控制效果的同时,兼顾施工经济性。

5) 基于现场全站仪实测数据可知,数值模拟结果与实际情况有较好拟合,具有参考和指导意义。

参考文献:

- [1] 储亮,董沐野,杨侨伟,等. 基于超前支护加固的大断面深埋软岩围岩隧道快速施工方法研究[J]. 公路,2024,69(9):379-386.
CHU L, DONG M Y, YANG Q W, et al. Research on the rapid construction method of large section deep buried tunnel with soft surrounding rock based on over-head support reinforcement[J]. Highway,2024,69(9):379-386.
- [2] 岳洪武,苗苗. 浅埋暗挖软岩隧道管棚预注浆加固效果分析[J]. 现代隧道技术,2021,58(2):111-117,134.
YUE H W, MIAO M. Analysis on pre-grouting reinforcement effect of pipe roofs for the shallowburied mined tunnel in soft rocks[J]. Modern tunnelling technology, 2021, 58(2):111-117,134.
- [3] 王耀龙,梁庆,尹帆. 软岩大变形公路隧道施工控制技术[J]. 施工技术(中英文),2025,54(9):135-139.
WANG Y L, LIANG Q, YIN F. Construction control technology of soft rock large deformation highway tunnel [J]. Construction technology,2025,54(9):135-139.
- [4] 窦廷明. 隧道穿越软弱断层破碎带坍塌机理与变形控制措施研究[J]. 施工技术(中英文),2024,53(9):132-136,141.
DOU T M. Study on collapse mechanism and deformation control measures of tunnel crossing weak fault fracture zone [J]. Construction technology,2024,53(9):132-136,141.
- [5] 王伟,李忠,沈学军,等. 软弱围岩隧道洞口浅埋段变形特征及控制措施研究[J]. 中国安全生产科学技术,2020,16(9):103-109.
WANG W, LI Z, SHEN X J, et al. Study on deformation characteristics and control measures of shallow-buried section at portal of soft rock tunnel [J]. Journal of safety science and technology,2020,16(9):103-109.
- [6] 张国亮,韩占波. 双层小导管在浅埋暗挖隧道施工中的应用[J]. 铁道科学与工程学报,2006,3(2):66-69.
ZHANG G L, HAN Z B. Application of technology of two-layered ductules in urban shallow-cover and close-cut tunnel[J]. Journal of railway science and engineering,2006,3(2):66-69.
- [7] 李润金,周彬,韩璇,等. 破碎软岩隧道超前注浆加固区形成机理与控制效应研究[J]. 施工技术(中英文),2025,54(17):106-112.
LI R J, ZHOU B, HAN X, et al. Study on formation mechanism and control effect of advanced grouting reinforcement zone in broken soft rock tunnel [J]. Construction technology, 2025, 54(17):106-112.
- [8] 杨坚. 双层注浆小导管在隧道穿越软弱围岩地段的应用[J]. 河南科技,2013,32(2):91,188.
YANG J. Application of double-layer grouting small conduit in tunnel crossing weak surrounding rock section [J]. Journal of Henan science and technology,2013,32(2):91,188.
- [9] 陈溪. 软岩隧道双层小导管超前支护效应研究[D]. 武汉:华中科技大学,2020.
CHEN X. Research on advance support effect of double-layer small conduit in soft rock tunnel [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology,2020.
- [10] 杨辉,裴俊豪,朱吉斌,等. 大断面浅埋隧道下穿公路进洞施工技术应用研究[J]. 隧道建设(中英文),2022,42(S2):440-448.
YANG H, PEI J H, ZHU J B, et al. Construction safety technology of shallow-buried large-cross-section tunnel portal crossing underneath operational highway [J]. Tunnel construction, 2022, 42(S2):440-448.
- [11] 张广乾,李博融,史宝童. 双层注浆小导管在隧道洞口工程中的应用探讨[J]. 地下空间与工程学报,2017,13(S1):198-202.
ZHANG G Q, LI B R, SHI B T. Application of double small duct grouting in tunnel portal engineering [J]. Chinese journal of underground space and engineering,2017,13(S1):198-202.
- [12] 傅翼,张琪,苏文建. 软弱土中隧道下穿暗渠变形分析与安全评价[J]. 地下空间与工程学报,2017,13(S2):854-859,888.
FU Y, ZHANG Q, SU W J. Deformation analysis and safety evaluation on tunnel underpass the culvert in soft soil [J]. Chinese journal of underground space and engineering,2017,13(S2):854-859,888.
- [13] 张忠. 黄土地区浅埋大断面铁路隧道不同超前支护影响分析[J]. 市政技术,2023,41(7):176-181.
ZHANG Z. Analysis of the influence of different advanced support of shallow railway tunnel with large-section in loess area [J]. Journal of municipal technology,2023,41(7):176-181.
- [14] 范洪海. Timah Tasoh 隧道大管棚与双排小导管数值计算分析[J]. 路基工程,2017(6):156-159,164.
FAN H H. Numerical calculation and analysis on umbrella pipe and double-row conduit pre-reinforcement supports for timah tasoh tunnel [J]. Subgrade engineering,2017(6):156-159,164.
- [15] 赵志有,王艳,曹文文. 黏质粉土地层中超浅埋暗挖地铁出入口地道施工技术[J]. 城市轨道交通研究,2017,20(11):78-82.
ZHAO Z Y, WANG Y, CAO W W. Metro entrance tunnel construction with supper shallow-buried excavation in clayey silt layer [J]. Urban mass transit,2017,20(11):78-82.