

隧道与地下空间拱形预制支护构件力学特性与安全稳定分析

童景盛, 张伟强, 赵国锐, 黎大玮, 崔腾斐, 李菊红

(中国市政工程西北设计研究院有限公司, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 针对隧道与地下空间拱形预制支护构件进行了力学特性试验与稳定分析研究。通过对比普通混凝土、泡沫混凝土以及泡沫混凝土掺加碳纤维和钢纤维网的预制支护构件, 发现掺加纤维能显著提升构件的极限荷载和变形能力。构建了围岩压力计算模型, 开发了相关软件, 分析了不同施工工法下的围岩压力和安全系数, 为设计和施工提供指导。安全稳定分析显示, 拱形预制支护构件能显著提高隧道稳定性和安全性。建立安全控制指标和标准, 确定合理的支护时机和强度, 提出了“强支护、短开挖”和让压支护策略, 为隧道工程的安全性和经济性提供了新思路。研究成果不仅为隧道支护设计提供了优化方案, 也为提高施工安全性提供了有力的技术支持。

关键词: 拱形预制支护构件; 力学特性试验; 稳定分析; 安全控制指标

中图分类号: U451+.4; U451+.5

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)09-0007-07

Analysis on Mechanical Properties and Safety Stability of Arched Prefabricated Support Components for Tunnel and Underground Space

TONG Jingsheng, ZHANG Weiqiang, ZHAO Guorui, LI Dawei, CUI Tengfei, LI Juhong

(Northwest Municipal Engineering Design and Research Institute Co., Ltd., Lanzhou 730000, China)

Abstract: The mechanical property tests and stability analysis studies are conducted on the arched prefabricated support components for tunnels and underground spaces. By comparing the prefabricated support components made of ordinary concrete, foamed concrete, and foamed concrete added with carbon fiber and steel fiber mesh, it is found that fiber addition can significantly enhance the ultimate load-bearing capacity and deformation performance of the components. The surrounding rock pressure calculation model is established, and the specialized software is developed to analyze the surrounding rock pressures and safety factors under different construction methods, providing the guidance for design and construction. The safety stability analysis shows that arched prefabricated support components can substantially improve the stability and safety of the tunnel. The safety control indicators and standards are formulated, the appropriate support timing and strength are determined, and the strategies of “strong support and short excavation” and yield-pressure support are proposed to provide the new ideas for safety and economy of tunnel engineering. The research results provide not only the optimization scheme for tunnel support design, but also the powerful technical support for enhancing the construction safety.

Keywords: arched prefabricated support component; mechanical property tests; stability analysis; safety control indicators

0 引言

隧道与地下空间支护体系作为工程结构的第一道防线, 其施工质量直接影响着工程安全与使用寿命。传统现浇混凝土衬砌支护存在施工周期冗长、

初期承载力不足等技术瓶颈, 极易诱发衬砌开裂渗水(渗透率达23%~37%)、围岩大变形(位移超限占比>15%)等典型病害。据统计, 我国隧道工程中因支护失效引发的安全事故中, 有64%与支护结构未能及时形成有效承载体系直接相关。因此, 构建具有即时承载能力的预制化支护体系^[1-2], 已成为突破传统工艺缺陷的关键技术路径。

国内众多学者对隧道衬砌支护构件的力学特性和施工安全稳定性进行了深入研究。例如, 郑颖人

收稿日期: 2025-05-08

基金项目: 甘肃省科技厅重点研发项目基金(24YFGA057);

甘肃省科协企业技术创新项目基金(GXHQY20250325-14)

作者简介: 童景盛(1973—), 男, 博士, 教授级高级工程师, 注册土木工程师, 副总工程师, 从事道桥隧研究与设计咨询工作。

等^[3]提出了隧道稳定分析的新理念,将稳定安全系数作为判断围岩稳定性的重要指标;Yuan等^[4]提出了“及时高强支护”理念,有效解决了施工中因支护不及时或支护强度不足导致的隧道变形坍塌等问题;于维刚等^[5]对隧道初期支护进行了加固和优化,有效解决了围岩变形和衬砌开裂等问题;赵伟等^[6]通过对公路隧道病害特征进行定量分析,揭示了隧道裂缝的失稳扩展深度和稳定系数的变化规律,并确定了隧道衬砌不同裂缝类型的稳定系数计算公式;孔超等^[7]通过现场测试分析隧道支护受力及变形特征,建立了隧道支护变形失稳模型,研究了支护承载及失稳机理;苏凯等^[8]通过数值模拟,提出了一种确定初期支护施作时机的新方法,并引入点安全系数评价监测断面开挖边界各点的稳定性。

国外学者如芬纳(Fenner)等^[9]对岩石洞室的初期支护受到的变形压力进行了相关计算公式和修正公式的研究;卡柯^[10]采用 Mohr-Coulomb 强度理论,以围岩二次应力弹性分析为基础,计算了塑性区内岩土自重对支护结构的影响。

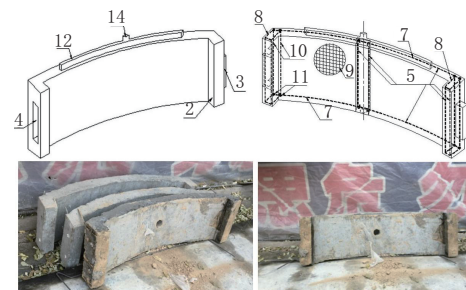
尽管国内外众多学者已经对隧道支护和安全稳定特性进行了广泛的分析与研究,但均未能结合支护构件本身的优化受力特点和稳定分析计算及安全控制应用进行相关研究。本研究通过理论分析和试验研究,深入探讨了拱形支护构件的力学特性及其安全稳定分析与计算,全面评估了支护构件的力学

性能和特点。研究结果揭示,新支护构件在增强隧道的稳定性和安全性等方面具有明显的优越性,为隧道支护工程的未来发展提供了新的思路和方法。

1 拱形支护构件力学特性试验研究

1.1 试验方案与材料参数

本文研究采用小矢跨比拱形预制支护构件,中部设置加劲受力筋,两端设有拱肋。构件标准长×宽×厚为 120 cm×50 cm×8 cm,采用碳纤维+钢纤维网、C20 型轻质泡沫混凝土支护构件,受力主筋根据构造要求配筋,箍筋固定主筋,间隔布置;板顶、底部设置双层钢筋网,如图 1 所示。



注:1—弧形拱状支护板;2—连接拱肋;3—拱肋凸块;4—拱肋凹槽;5—钢筋骨架;6—轻质泡沫混凝土;7—主筋;8—连接箍筋;9—钢筋网;10—框架式肋筋;11—弯钩;12—凸板;13—凹槽;14—小凸起;15—小凹槽。

图1 预制支护构件制作及结构简图

试验将预制支护构件分为3组:C20 普通混凝土型、C20 泡沫混凝土型、C20 泡沫混凝土+碳纤维+钢纤维网型。每组包括3个构件,各组构件材料详见表1。

表1 预制支护构件材料参数表

分类	主筋		箍筋		钢纤维		碳纤维
	类型	直径/mm	类型	直径/mm	类型	直径/mm	M55J
C20 普通混凝土	HRB400	20	HPB300	10	—	—	不添加
C20 泡沫混凝土	HRB400	20	HPB300	10	—	—	不添加
C20 泡沫混凝土+碳纤维+钢纤维网	HRB400	20	HPB300	8	钢丝 20 mm	0.75	添加 0.8%

1.2 加载及数据采集

为了确保试验的准确性和可靠性,试验采用图2所示的加载及监测系统加载和监测。加载点距跨中的距离 0.5 m,采用分级加载方式,每级加载 10 kN 并稳定 30 s,依次循环进行。在压力达到最大值后,继续加载直至达到试验极限位移要求,并记录每次加载峰值荷载。

对加载的3组试验构件,分别测得其荷载、跨中挠度和跨中截面应变值,进行平均取值。对3种试验构件的荷载—挠度—应变关系曲线进行对比如图3所示。

1.3 试验构件破坏过程及力学分析

(1)3种预制支护构件的荷载—挠度曲线变化趋

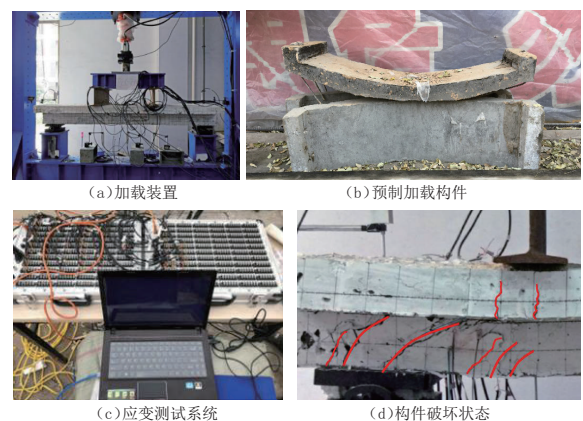


图2 预制支护构件加载及破坏图

势具有一致性。具体来说,随着荷载的逐步增加,预制构件的挠度也随之增大。这一现象表明,构件在

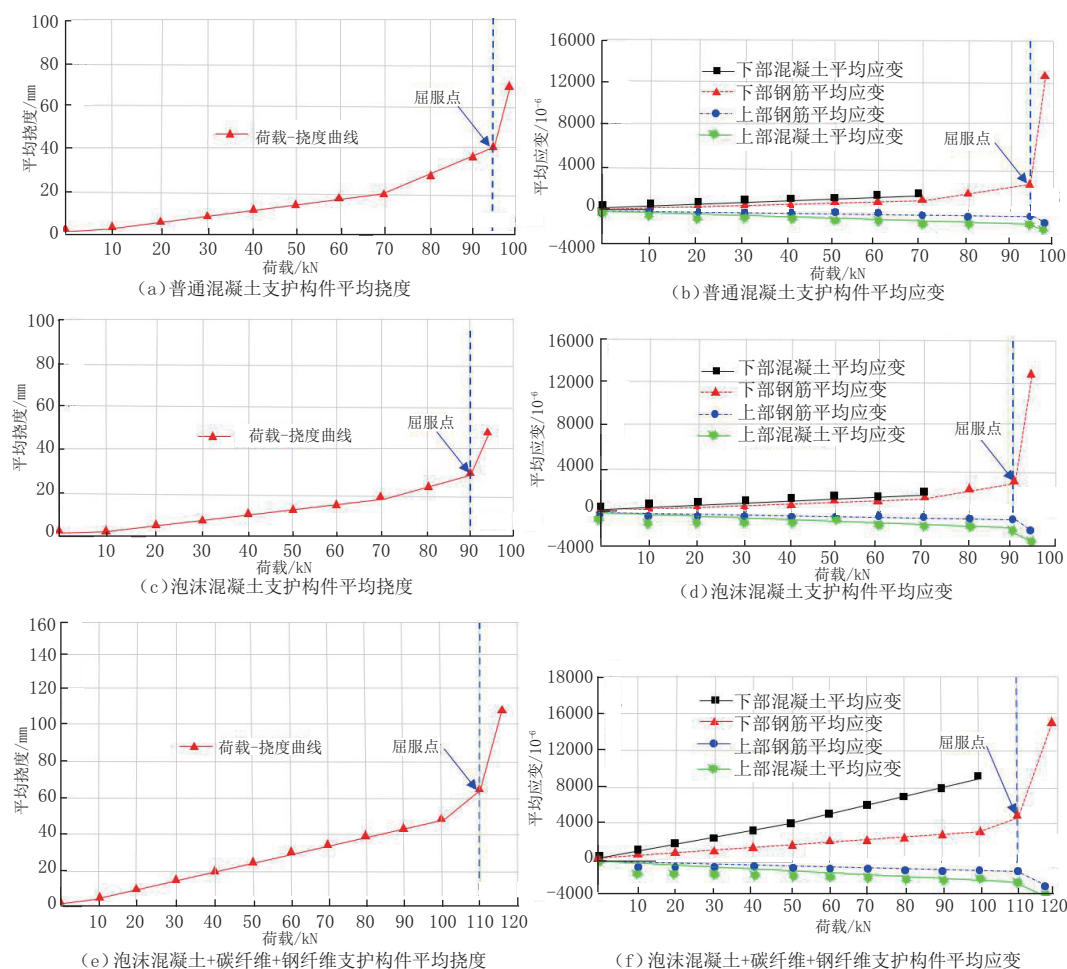


图3 不同预制支护构件荷载-挠度-跨中应变关系曲线图

受力过程中的变形行为遵循相似的力学规律。

(2) 构件中掺入碳纤维和钢纤维,可以显著改善混凝土的破坏形态。无论是在受压还是受拉状态下,传统的泡沫混凝土和普通混凝土均表现出脆性破坏特征。相比之下,掺入碳纤维和钢纤维的混凝土则展现出明显的塑性破坏特性。在荷载作用下,这种复合材料的承载力和挠度得到提升,破坏过程被延迟,试件表面仅出现细小裂缝。这表明,掺入纤维后,构件的抗压和抗拉强度均有显著提高。

(3) 试验构件在初期加载至约 10 kN 时,各组构件的荷载-挠度曲线斜率开始减小;3 组试验构件的荷载分别达到 95、90、110 kN 时,构件的整体刚度迅速下降,荷载-挠度曲线斜率急剧降低。值得注意的是,采用泡沫混凝土(掺碳纤维和钢纤维)构件的极限承载力及跨中挠度增量明显大于普通混凝土和泡沫混凝土构件。

(4) 劈裂抗拉强度的试验结果进一步证实了纤维增强混凝土的优势。与普通混凝土和泡沫混凝土相比,掺入纤维的混凝土构件的劈裂抗拉强度显著更高。这一结果归功于钢纤维本身优异的抗拉性

能,其能够在劈拉破坏面处实现荷载传递和连接,有效改善裂缝周围的应力集中和裂缝的延展。

构件力学特性参数如表 2 所示,采用碳纤维材料后,支护构件的性能改变具体数值和分析结果如表 3 所示,这为进一步比较和评估提供了数据支持。

表2 试验构件力学特性统计表

类型	极限荷载/kN	二次加载极限荷载/kN	跨中挠度/mm	回弹位移 max/mm
普通混凝土	95.65	80.55	98.55	38.85
泡沫混凝土	90.25	70.85	96.80	32.50
泡沫混凝土+碳纤维+钢纤维	119.65	90.68	160.50	63.45

表3 采用碳纤维材料支护构件性能改变对比表

性能指标	C20	泡沫混凝土材料	机理解释
极限荷载	25.1	32.6	三维应力传递效应
裂缝能密度	180	210	纤维桥联作用
损伤容限	150	190	多级耗能机制
残余承载力	58	73	界面锁键效应

1.4 试验结论

通过上述试验,发现泡沫混凝土构件在加入碳纤维和钢纤维后,不仅在极限荷载和变形能力上有

所提升,而且在保持轻质特性的同时,增强了构件的承载能力。主要试验结论如下。

(1)实验结果表明,泡沫混凝土构件在加入碳纤维和钢纤维后,其极限荷载和变形能力得到了显著提升。与普通混凝土构件相比,其极限荷载提升了25.10%,与仅使用泡沫混凝土的构件相比提升了32.58%。在二次加载条件下,这种提升分别达到了12.58%和28.0%。这些数据有力地证明了碳纤维和钢纤维的加入显著增强了构件的极限承载能力,无论是在破坏前还是破坏后,均优于普通混凝土和泡沫混凝土构件。

(2)除了承载能力的提升,泡沫混凝土中加入碳纤维和钢纤维还可以显著提高构件的跨中挠度和回弹位移。与普通混凝土构件相比,采用泡沫混凝土加碳纤维和钢纤维的构件跨中挠度分别增加了62.86%和65.81%,而回弹位移分别提高63.32%和95.23%。这一结果表明,掺入纤维材料的构件在承受荷载时,具有更强的变形和回弹能力,这对于提高结构的抗震性能和耐久性具有重要意义。

(3)尽管泡沫混凝土构件的密度较低,力学参数普遍低于普通混凝土构件,但其轻质特性是其主要优势。在保持相同重量的情况下,泡沫混凝土构件能够提高构件的承载能力,这对于减轻结构自重、提高结构效率具有积极作用。

2 拱形支护技术安全稳定分析与计算

本文基于岩土的物理参数,提出了一种立体计算模型,用于推导出计算围岩压力设计值的通用公式。然后,根据围岩压力计算及安全稳定分析开发软件^[10],分步计算和绘制出常用全断面法、台阶法、CD法、眼镜法等4种常用施工工法各开挖进尺和时程对应的围岩压力值及曲线图;同时,可计算各开挖进尺和时程对应的安全系数和稳定分析判断结果。为了进一步指导实践,提出围岩稳定判断安全系数的取值分类建议,具体如表4所示。

表4 安全系数分类与围岩稳定判断表

序号	安全系数K值范围	围岩稳定判断
1	小偏心受压,<1	不稳定
2	1~1.4	暂时稳定
3	1.4~1.8	短期稳定
4	1.8~2.4	中期稳定
5	>2.4	长期稳定

根据工程经验,表4在系统分析计算和判断围岩稳定时,限制了安全系数K值的取值范围:当计算安

全系数小于1时,围岩处于不稳定状态,需要立即进行加强支护和其他处理措施;当安全系数 $1 < K < 1.4$ 时,围岩处于暂时稳定状态,需要及时加固;当安全系数 $1.4 < K < 1.8$ 时,为短期稳定,需要在限定时间内,及时开挖和支护;当安全系数 $2.4 < K$ 时,围岩处于长期稳定状态。

安全系数K值依据《公路隧道设计规范》(JTG 3370.1—2018)中偏心受压构件极限承载力N与实际内力之比得出,具体计算公式如下:

$$\begin{cases} K = \frac{N_{\mu}}{N} \geq [K] \\ N_{\mu} = \varphi \alpha R_a b h \end{cases} \quad (1)$$

式中:K为安全系数;N为轴向力; φ 为构件的纵向弯曲系数; α 为轴向力的偏心影响系数; R_a 为混凝土或砌体的抗压极限强度;b为截面的宽度;h为截面的厚度。

图4所示为4种常用施工工法在不同开挖进尺和时程下的围岩压力值及其曲线图。新支护技术通过计算安全稳定系数和围岩稳定判断分析,提出一种在工程应用中可行的围岩稳定判断方法。这种方法不仅提供了安全系数与围岩自稳状态时间范围的对应关系,而且可以初步判断开挖后围岩的稳定性,从而为设计和施工提供指导。

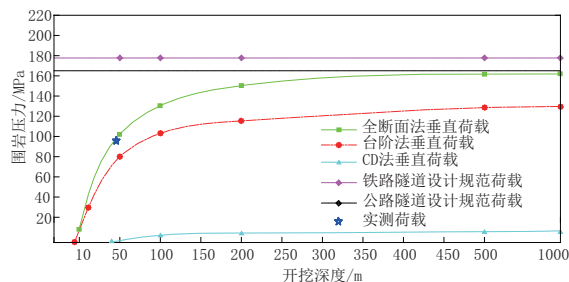


图4 不同施工工法围岩压力计算比较图

在图4中可以观察到几个关键要素:围岩压力值的计算、不同开挖进尺对应的围岩压力值,以及安全稳定系数等结果。这些要素共同构成了评估围岩稳定性的基础^[13]。围岩压力值的计算:这是评估围岩稳定性的起点,其反映了围岩在不同施工方法下所承受的压力。

通过对这些数据的综合分析,可以得出:围岩稳定性不仅受到施工方法的影响,还与开挖进尺和时程密切相关。新支护技术的应用,使得能够更准确地预测和评估围岩的稳定性,从而优化施工方案,提高工程安全性。

2.1 围岩稳定计算与判断

表5分析了不同施工工法和开挖深度对垂直荷

载、水平荷载及施工安全系数值的影响^[14]。研究结果表明,这些参数对于指导施工过程、优化设计和施工方案、避免设计问题和工程材料浪费具有重要意义,最终确保了设计和施工的安全性。

在表 5 数据可以发现,在 IV 级围岩的开挖过程中,尤其是在开挖初期的 0~8 m 段,荷载值为 0。这一结果表明,在该开挖长度范围内,围岩压力极小,围岩能够保持自稳,无需额外支护。这与实际工程

情况相吻合,验证了数据计算的准确性和施工方案的合理性。

进一步分析表 5 中的数据,可以发现,随着开挖深度的增加,荷载值也会相应变化。这要求在施工过程中,根据实时监测的荷载数据,及时调整施工方案和支护措施。例如,在荷载值较高的区域,可能需要增加支护强度或采用更为保守的开挖方法,以确保施工安全和工程质量。

表 5 不同施工工法对应 V 级围岩压力和安全稳定性分析表

开挖深度/m	6	8	10	15	20	30	40	50	100	200	500
CD 法垂直荷载 q						0	0.2	0.6	2	3.1	3.9
台阶法垂直荷载 q		0	4.03	18.90	34.00	55.90	70.30	80.20	103.60	117.30	126.30
垂直荷载 q	0	0.6	6.4	27.4	46.4	73.8	91.6	104	133.1	150.3	161.6
全断面法											
水平荷载 e	0	0.3	3.6	15.6	26.4	42	52.1	59.2	75.7	85.5	92.0
安全系数 K			4.09	3.15	2.61	2.09	1.85	1.72	1.46	1.34	1.27
稳定判断结果			稳定	稳定	稳定	稳定数月	中期稳定 1 月	中期稳定 1 月	短期稳定 1 周	暂时稳定 1 d	不稳定

3 拱形支护技术的安全与应用控制

为了确保工程的安全性和稳定性,本研究综合考虑了围岩条件、荷载效应的动态特性以及支护结构型式等多种因素,建立了一套客观合理的控制指标和标准。在满足这些安全控制标准的前提下,本研究旨在确定隧道的合理支护时机和支护强度,以实现围岩与支护的共同承载,从而提高工程的安全性和经济性。

3.1 安全控制指标与标准

课题研究采用围岩支护体系的总体位移和承载状态两种指标作为控制指标,以确保结构在各种工况下都能够保持稳定和安全。

3.1.1 总体位移控制

研究通过监测或计算得到的位移值与极限位移进行比较,以评估结构的稳定性。具体来说,采用以公式(2)来表示这种关系:

$$K_{\text{rock-support}} = U_{\text{limit}} / U \quad (2)$$

式中: U_{limit} 为围岩支护体系的极限位移; U 为位移监测值或计算值。

为了更具体地控制位移,根据距离开挖断面的不同,设定了不同的位移控制标准^[15],具体如表 6 所示。

表 6 隧道与地下空间位移控制表

类别	允许收敛率/%	$K_{\text{rock-support}}$
距开挖断面 1D	≤65	≥1.5
距开挖断面 2D	≤90	≥1.1
距开挖断面>2D	≤90	≥1.1

3.1.2 承载状态控制

通过监测支护结构的承载极限,来评估其在不同荷载下的稳定性^[16]。承载状态的控制可以通过公式(3)来表示:

$$K_{\text{support}} = \min(P_{\text{limit}}/P_i) \quad (3)$$

式中: P_{limit} 为支护结构的承载极限; P_i 为支护结构的承载力。

3.2 合理支护时机与支护强度

支护时机与支护强度的合理性研究,是用来实现地应力的合理释放与支护的有效约束之间的平衡关系。通过这种平衡,围岩与支护能够共同发挥支撑作用,达到围岩支护共同承载的最优效果。研究表明,支护时机的不同会影响初期支护和围岩承担荷载的比例,进而影响工程的安全性和经济性。

在具体工程实践中,提前支护有利于控制变形,但对支护构件的强度要求较高。初期支护结构往往难以满足这一要求,因此,研究提出了 2 种解决方案:

方案 1: 加强初期支护强度,并及时跟进二次衬砌。

方案 2: 让围岩充分变形,释放荷载;预留富裕变形量,采用让压支护或适当延迟支护施作时机。

3.2.1 实际工程案例分

以某 V 级围岩段隧道支护工程为例,分析在不同支护时机下所需的支护抗力值。该隧道最大埋深约 120 m。首先,对围岩力学参数与支护参数进行了详细分析,具体数据如表 7 所示。通过对围岩特征曲线与纵向位移曲线的综合分析,确定了不同支护时机下所需的支护抗力值。相关分析结果如图 5 所示。

表7 隧道与地下空间V级围岩力学与初期支护参数表

围岩类别	变形模量 E/GPa	泊松比 μ	黏聚力 C/MPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	容重 $/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$
V	1.5	0.35	0.2	20	18.5
喷锚支护	喷混凝土	挂网	锚杆	钢拱架	
	全断面 20 cm 厚 C25	全断面 $\phi 8@15\text{ cm}\times 15\text{ cm}$	全断面 $\phi 25@1.25\text{ m}\times 1.25\text{ m}$ 注浆锚杆	全断面 120@60 cm	
新支护构件	预制支护构件	掺料	规格	型式	
	C20 轻质泡沫混凝土	碳纤维材料、碳纤维	宽 $\times$ 长=0.5 m $\times$ 1.2 m	拱形(蜂巢状组合)	

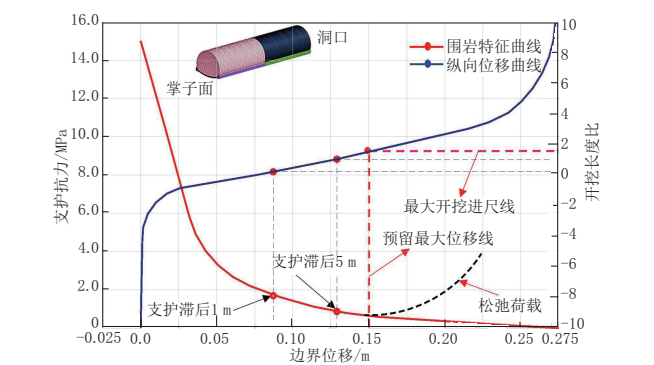


图5 支护与开挖进尺对应强度与位移曲线图

通过对表7中的数据进行分析,发现该V级围岩段隧道的力学参数与支护参数具有以下特点:围岩强度较低,需要采取相应的支护措施;围岩变形较大,支护结构需要具备一定的柔性;围岩渗透性较强,需要考虑地下水对支护结构的影响。这些特点为后续支护抗力值的确定提供了重要依据。

通过对围岩特征曲线与纵向位移曲线的对比分析,发现:围岩特征曲线反映了围岩的力学特性,与支护抗力值密切相关;纵向位移曲线反映了围岩的变形特性,对支护时机的确定具有指导意义。综合考虑这两方面因素,确定了不同支护时机下所需的支护抗力值。

根据围岩特征曲线与纵向位移曲线的分析结果,确定了不同支护时机下所需的支护抗力值。如图5所示,随着支护时机的推后,所需的支护抗力值逐渐增大。这表明在围岩变形较小时及时进行支护,可以有效降低支护抗力值,提高支护效果。

图5提供了关键的数据支持。该图表明,当预留变形量设定为15 cm时,每次开挖的最大进尺可达到约9 m。这一发现对于确定开挖进度和安全措施至关重要。

进一步分析支护滞后对围岩稳定性的影响,发现当支护滞后掌子面1 m时,为了保持围岩的稳定,所需的支护强度大约为1.8 MPa。然而,如果支护滞后增加到5 m,所需的支护强度则显著降低,约为0.86 MPa。这一变化强调了及时支护在维护围岩稳定性中的重要性。

为了满足这些支护强度要求,实测数据分析提供了几种可能的支护方案。采用喷锚结合钢拱架的支护方法,可以提供大约1.30 MPa的支护强度,这在某些情况下可能足够。但是,如果需要更高的支护力,采用研究新支护构件,可以提供超过2.50 MPa的支护力,这在更复杂的地质条件下可能是必要的。为了实现更高的支护强度,可以结合喷混与新支护构件共同承载作用,这种方法可以提供超过3.0 MPa的支护强度。这种综合支护方案在面对极端地质挑战时,能够提供额外的安全保障。

图5不仅提供了开挖进尺与预留变形量之间的关系,还揭示了支护滞后对围岩稳定性的影响,并比较了不同支护方案的强度。这些信息对于优化隧道开挖过程中的支护策略至关重要,确保了工程的安全性和效率。

3.2.2 支护措施的优化选择

隧道开挖的初期阶段,支护措施的选择至关重要。如果支护强度不足,可能会导致围岩不稳定,从而增加工程风险。因此,研究探讨了2种主要的支护措施:一是“强支护、短开挖”策略;二是通过适当滞后的让压支护施作时机来实现围岩与支护的最佳共同承载作用。这2种方法都旨在确保隧道开挖过程中的围岩稳定性。

首先,分析“强支护、短开挖”策略。这种策略的核心在于通过增强支护强度来减少开挖过程中的围岩变形。图6展示了滞后让压支护作用与预制构件支护作用的对比曲线图,从中可以更直观地理解不同支护措施的效果。

对比曲线图中可以看到,如果采用本文研究的新支护构件,可以提供3.0 MPa以上的强度,这足以满足围岩稳定所需的强度和位移要求。这种新支护构件的优势在于其高强度和稳定性,能够有效地控制围岩变形,减少工程风险。

然而,如果选择喷锚支护措施,情况则有所不同。当支护时机滞后掌子面1.0 m时,喷锚支护措施仅能提高1.3 MPa的强度,这远远不能满足围岩稳定

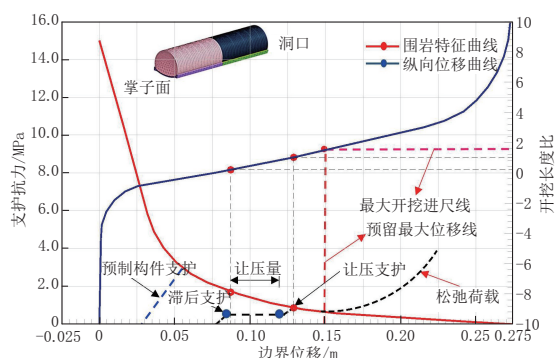


图6 滞后让压支护作用与预制构件支护作用对比曲线图

需要的1.8 MPa的要求。在这种情况下,需要考虑让压或延迟支护措施,以增强支护效果。

进一步分析,如果将支护措施滞后至掌子面5.0 m处,此时的承载状态安全系数为 $1.30/0.86=1.51$ 。这意味着初期支护承载能力不仅能够满足围岩稳定要求,而且还有一定的安全富裕度。这种滞后支护策略的优势在于它允许围岩在一定程度上自然变形,释放能量,从而减少对支护结构的压力,同时仍能保持足够的安全系数。

综上所述,选择合适的支护措施对于隧道开挖初期的围岩稳定性至关重要。通过对比分析不同支护措施的效果,可以得出预制支护构件因其高强度和稳定性而成为首选;而在特定条件下,滞后支护措施也是一个有效的选择,它能够在确保安全的同时,减少对支护结构的压力。这些策略的选择应根据具体的地质条件和工程需求来确定,以实现最佳的工程效果。

4 结 语

本文深入探讨了隧道与地下空间拱形支护构件的力学特性、安全稳定分析与计算,以及拱形支护技术的安全与应用控制。经过系统的实验和分析,不仅在理论上为拱形支护构件的设计和应用提供了科学依据,而且在实践中为隧道与地下空间工程的安全性和经济性提供了有效的技术支持,得出以下结论。

(1)通过对不同材料和结构的支护构件进行力学特性试验,发现掺加碳纤维和钢纤维网的泡沫混凝土拱形支护构件在提升极限荷载和变形能力方面具有显著优势。该试验不仅丰富了拱形支护构件的材料选择,也为该支护构件的设计和应用提供了坚实的科学基础。

(2)通过构建围岩压力计算模型,开发了相关软

件,并对不同施工工法条件下的围岩压力和安全系数进行分析和计算,为设计和施工提供了实时指导,有效地确保了隧道工程的安全性和稳定性,提高了工程质量。

(3)建立了一套安全控制指标和标准,并确定了合理的支护时机和强度。通过提出“强支护、短开挖”和让压支护策略,优化了工程成本,为隧道工程的安全性和经济性提供了创新的思路。

参考文献:

- [1] 童景盛,王胜利,韩秀丽,等.地下空间施工拼装用预制支护构件:中国,CN205260054U[P].2016-05-25.
- [2] 童景盛,陈双庆,李菊红,等.一种大跨度地下空间深基坑支护系统与施工方法:中国,CN110878555A[P].2020-03-13.
- [3] 郑颖人,丛宇.隧道围岩稳定性分析及其判据[J].隧道建设(中英文),2013,33(7):531-536.
- [4] SONG Yuan, WANG Changbai, HUANG Mingli, *et al.* Incorporating Trenchless Technology Research[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2024(145): 105581.
- [5] 于维刚,宋常胜,孙智海,等.深埋长大软岩隧道施工围岩稳定关键技术研究[J].现代隧道技术,2023(增刊1):220-227.
- [6] 赵伟,黄瑞,曾彬,等.公路隧道衬砌裂缝稳定性的多因素影响分析[J].地下空间与工程学报,2021(增刊1):425-431.
- [7] 孔超,张俊儒,王海彦,等.深埋软岩大变形隧道支护变形特征及承载机理研究[J].中国铁道科学,2021,42(6):103-110.
- [8] 苏凯,张妍珩,伍鹤皋,等.隧洞开挖过程中围岩安全系数演化特征与支护时机选择方法研究[J].岩石力学与工程学报,2019(增刊1):379-390.
- [9] BHAWANI S, GOEL R K, JETHWA J L.Support pressure assessment in arched underground openings through poor rock masses[J].Engineering Geology, 1997, 48(2): 59-81.
- [10] KOLYMBAS D, WAGNER P.Groundwater ingress to tunnels—the exact analytical solution[J].Tunneling and Underground Space Technology, 2007, 22(1): 23-27.
- [11] TONG J S. General formulas for calculating surrounding rock pressure of tunnels and underground spaces[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2020, 24(4): 1348-1356.
- [12] 中国市政工程西北设计研究院有限公司.深基坑开挖与支护稳定分析计算程序V1.0.中国:2024SR055789[Z].兰州:中国市政工程西北设计研究院有限公司,2024.
- [13] TONG J S. Research on application of multi-factor surrounding rock pressure calculation theory in engineering[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2021, 25(6): 1-12.
- [14] TONG J S, ZHANG H M, ZHANG W Q. Application and numerical simulation of key technologies for deep foundation pit support[C]// Proceedings of the 9th International Conference on Civil Engineering. Berlin: Springer Nature, 2023: 427-438.
- [15] 朱汉华,周小涵,王葵,等.隧道围岩与支护结构变形协调控制机理及工程应用[J].地下空间与工程学报,2023,19(1):79-86;94.
- [16] 陈建勋,陈丽俊,罗彦斌,等.大跨度绿泥石片岩隧道大变形机理与控制方法[J].交通运输工程学报,2021,21(2):93-106.