

软土地层隧道围岩分区初期支护技术研究

Study on the Initial Support Technology of Tunnel Surrounding Rock in Soft Soil

高熙贺

(杨凌职业技术学院交通与测绘工程分院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 软土地层通常具有较低的承载力和较高的压缩性, 隧道开挖过程中极易发生变形和坍塌。为了控制围岩的变形和破坏, 确保施工安全, 提出软土地层隧道围岩分区初期支护技术。通过合理规划围岩压力监测点, 采集压力数据; 利用简化的锚杆、钢架及岩体结构面, 构建初期支护本构模型; 计算锚杆与钢架的最佳间距和长度, 并以此为依据设计复合支护结构, 实现围岩分区初期支护。结果表明: 所提方法隧道沉降位移较小、塑性区分布面积较小。体现了支护技术的有效性, 具有较好的应用价值。

关键词: 软土地层隧道; 初期支护; 围岩压力; 锚杆应力; 钢架应力

中图分类号: U457 文献标志码: A 文章编号: 1005-8249 (2024) 04-0087-05

DOI:10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2024.04.015

GAO Xihe

(Yangling Vocational and Technical College Traffic and Surveying Engineering Branch, Yangling 712100, China)

Abstract: Soft ground layer usually has low bearing capacity and high compressibility, collapse and deformation are very easy to occur during tunnel excavation. In order to effectively control the deformation damage of the surrounding rock and ensure the construction safety, the initial support technology for the surrounding rock of the tunnel in soft ground layer in zones is proposed. Pressure data are collected by reasonably planning the peripheral rock pressure monitoring points; Construct the initial support intrinsic model by using the simplified anchor rods, steel frame and rock structure surface; Calculate the optimal spacing and length of anchor rods and steel frames, and design the composite support structure based on them to realise the initial support in the surrounding rock zones. The results show that the proposed method of tunnel settlement displacement is small, and the distribution area of plastic zone is small. It reflects the effectiveness of the support technology and has good application value.

Keywords: tunnel in soft soil stratum; initial support; surrounding rock pressure; bolt stress; steel frame stress

0 引言

在我国沿海、内陆湖盆及河流两岸, 常见软土地层。这些地层因承载力低、压缩性高, 在隧道开

挖时易出现变形、坍塌险情。有效的初期支护技术, 能够控制围岩变形和破坏, 为隧道创造稳定施工环境, 减少围岩干扰, 确保隧道结构的长久稳定和耐用。因此, 许多学者进行了相关研究, 并取得一定成果。王睿等^[1]根据松动圈理论建立隧道有限元模型, 记录模型释放应力全过程中围岩支护强度的变化规律, 实现软土地层隧道围岩初期支护, 该方法存在隧道沉降位移大的问题; 黄启贵等^[2]通过数值模拟方法建立隧道掘进过程的力学仿真模型, 并从涌水、涌泥、围岩周边位移和洞身破碎带四种角度计算支护模型全断面帷幕所需要的注浆, 实现软土

作者简介: 高熙贺 (1983—), 男, 硕士, 副教授, 研究方向: 地质工程、岩土工程、城市轨道交通工程技术、城市轨道交通运营管理。

收稿日期: 2023-05-24

岩土力学

地层隧道围岩初期支护；林波等^[3]通过分析隧道与围岩的平面交叉关系和立体交叉关系，标定隧道三维模型参数，建立具有应力应变特性的隧道三维有限元模型。依托模型添加施工支护结构，实现软土地层隧道围岩初期支护。上述方法存在塑性区分布面积大的问题。

为了解决上述方法中存在的问题，提出软土地层隧道围岩分区初期支护的方法。通过规划监测点采集围岩压力，简化模型计算支护参数，设计复合结构以实现分区初期支护。

1 围岩压力量测值获取

围岩压力是指隧道周围岩石对隧道结构施加的压力，是影响隧道稳定性的重要因素。通过量测围岩压力，可以实时掌握隧道周围岩石的力学行为，评估隧道结构的稳定性，并为支护方案的设计和调整提供数据支持。考虑到软土地层的自承载能力较弱，在监测隧道围岩压力前^[4]，应提前规划监测点，以防止现场测试工作造成围岩人为损毁。常规软土地层隧道监测点布局如图1所示。

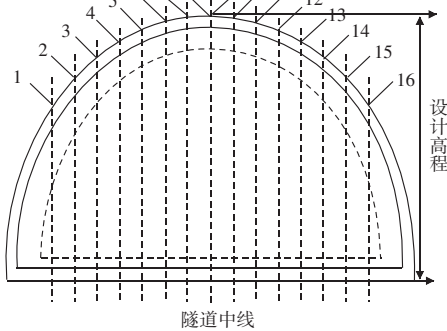


图1 常规软土地层隧道监测点布局

Fig. 1 Layout of monitoring points for conventional soft soil layer tunnels

将土压力盒埋入位点^[5]，在监测位点提前喷射的混凝土达到强度要求时，采用测试元件对洞周进行扫描，得到不同时间点下围岩压力的量测值。

2 隧道围岩分区初期支护

2.1 支护力学参数选取

在监测施工现场围岩压力的基础上，建立初期支护材料本构模型，为建立锚杆-钢架复合支护结构奠定坚实的基础。

考虑到隧道恶劣的作业环境和重复施工对围岩的扰动影响，围岩分区初期常采用锚杆、钢架等高压缩性材料作为抵御围岩压力的支护材料^[6]。为此，需考虑锚杆惯性力矩及钢架连接件接触应力对围岩的扰动影响，在此前提下，通过简化锚杆、钢架及周围岩体的结构面，建立初期支护材料本构模型。

锚杆惯性力矩的表达式如下：

$$H = \frac{\partial_i + \partial_j}{2} \left(1 + \frac{3\alpha}{e} \right) \tan \lambda \quad (1)$$

式中： ∂_i 为地应力； ∂_j 为锚杆剪切应力； e 为隧道内轮廓半径； α 为靠墙侧锚杆轴力； λ 为围岩收敛量。

钢架连接件接触应力的表达式如下：

$$L = \sqrt{\frac{2g}{|c^i| \cdot |c^j|}} \quad (2)$$

式中： c^i 为工字钢轴力； c^j 为钢架预留伸缩缝宽度； g 为工字钢横截面积。

初期支护材料本构模型的表达式如下：

$$J = 2Lf_{ij} \arctan \frac{\sigma}{2b} + H \quad (3)$$

式中： f_{ij} 为锚固盲区； b 为相邻钢架端头间距； σ 为内、外简钢管的轴力差。

2.2 支护设计

为更合理地分析隧道支护力学响应规律，应考虑锚杆惯性力矩及钢架连接件接触应力对围岩的扰动影响，对这两种初期支护力学参数进行分析。大、小死角的最大扫掠角度计算公式如下：

$$\begin{cases} U = \frac{2J_{\max}^n}{a_w} \\ E = \zeta \sin \hat{y}_s \end{cases} \quad (4)$$

式中： a_w 为位错宽度； J_{\max}^n 为支护材料汇合区到岩体的距离； \hat{y}_s 为隧道径向角度； ζ 为有效锚杆深度。

在掌握锚杆惯性力矩及钢架连接件接触应力与隧道围岩关系的基础上，计算实际工况下锚杆组和钢架组的最适间距和复合长度，使支护材料全方位、无死角地固定在岩体天然结构面，为设计锚杆-钢架复合支护结构创造前提条件。初期支护钢架的主要应力为压力，而钢架的悬空作用会导致较大的应力变化。这种不利的受力条件极易造成支护结构失稳。锚杆应力通常受到多种因素的影响，包括地质

条件、地应力水平、锚杆类型、锚杆埋设方式及埋设时间等。此外，隧道开挖后，位于小主应力方向的围岩侧壁常表现出明显的剪切破坏特征。因此，支护设计采用相互交错延伸的楔形结构，不仅能提高锚杆、钢钉的整体抗力，还能减少锚固点横向、纵向和环线裂缝，因此视楔形结构为复合支护的理想结构，按有压隧洞理论计算现场应变关系下锚杆和钢架的最适纵向间距和最适横向间距。初期支护钢架因其刚度特性，需考虑连接件接触应力对锚杆组和钢架组间距及复合长度的影响。设计复合支护结构如图 2 所示。

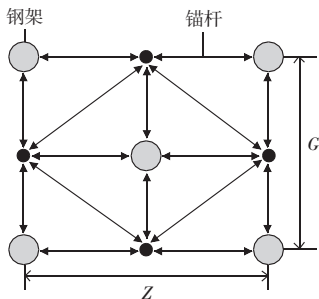


图 2 复合支护的理想结构

Fig. 2 Ideal structure of composite support

有压隧洞理论表达式为：

$$T = 2 \tan r \left(\frac{d_r^n}{2} \right)^2 + \frac{\sin U}{\cos E} \quad (5)$$

式中： r 为塑性区半径； d_r^n 为隧洞巷道径向位移。通过缩小塑性区半径，增加锚杆处于围岩稳定区的长度，以提升支护结构的整体抗力。

当参数锚杆平均应力 s_1 、后壁锚杆屈服半径 q 确定后，最适纵向间距和最适横向间距的计算公式为：

$$\begin{cases} X = \prod_{j \neq 0} k_j(\tau) T \\ C = \frac{1}{i_n} \sum_{k \neq 0} v_k + s_1 q \end{cases} \quad (6)$$

式中： k_j 为锚杆与塑性区交界面应力； τ 为锚杆横截面屈服半径； i_n 为钢筋中性点； v_k 为斜交钢架中性点经验估计值。

由于在塑性流动区和弹性区的交界处易形成锚杆应力峰值，造成塑性区围岩相对于锚杆向隧道内变形，而弹性区的围岩相对于锚杆向外变形。初期支护阶段支护材料需要穿越弹性区、应变软化区和

塑性流动区三层岩体，才能确保隧道围岩接触面不存在大、小死角。假设三层岩体为均值各向同质岩体，在应变关系下计算锚杆与钢架到洞壁面的最适距离，以此确定锚杆组和钢架组的复合长度。最适距离计算公式如下：

$$\begin{cases} M = X \ell_0 - \left[1 - 0.3 (\ell_n^2)^2 \right] \\ B = C b t_a (j - 1)^{1.5} \end{cases} \quad (7)$$

式中： ℓ_0 为混凝土与锚杆的黏结性； ℓ_n 为锚定跨中挠度； t_a 为钢梁长度方向； j 为贯穿三层岩体的复合载荷。

3 实验与结果

以某市正在施工的两处软土地层隧道为例，验证不同方法对围岩分区初期的支护效果。采用相互交错延伸的楔形结构进行支护，依据有压隧洞理论，确定实际工况下锚杆组和钢架组的最适间距和复合长度。隧道围岩以 V 级围岩为主，均采用 C20 喷射混凝土做初期支护，拱部采用全螺纹早强砂浆锚杆进行锚固，钢架采用 HW100 型钢，锚杆组和钢架组的最适间距为 0.3 m，复合长度为 6.5 m。隧道三维图如图 3 所示。

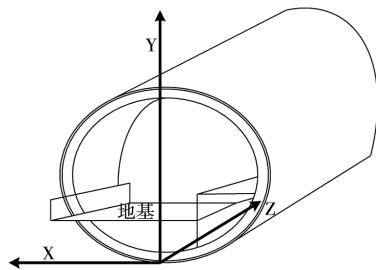


图 3 隧道三维图

Fig. 3 Three dimensional diagram of the tunnel

3.1 隧道沉降位移

隧道施工过程中，主洞的支护在围岩压力的作用下发生沉降。通常情况下，软土地层隧道的沉降位移应不超过以下标准：挖掘初期 4~10 mm，挖掘中期 4~8 mm，挖掘后期 8~12 mm，总沉降位移应小于 30 mm。

分别采用本文方法、观察围岩变形过程方法和数值模拟方法进行试验，设计支护结构，对比初期支护各方法在 X-Y 平面、Z-Y 平面和 X-Z 平面的隧道沉降位移。不同方法的隧道沉降位移如图 4 所示。

岩土力学

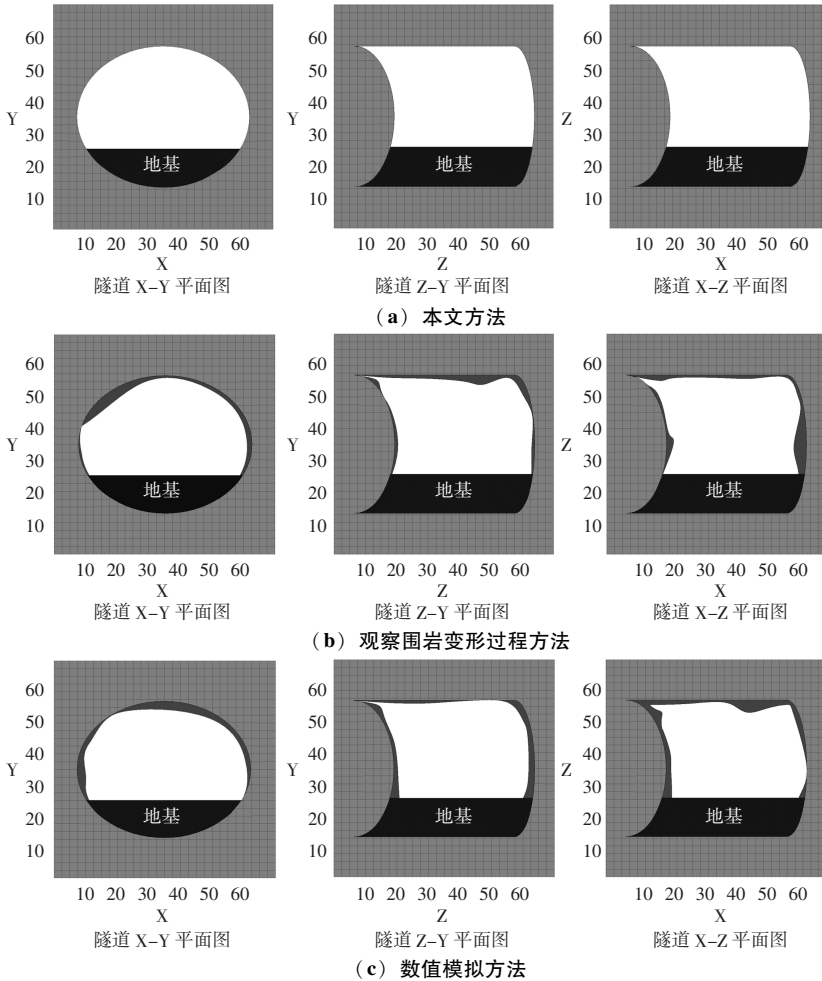


图4 不同方法的隧道沉降位移

Fig. 4 Tunnel settlement displacement using different methods

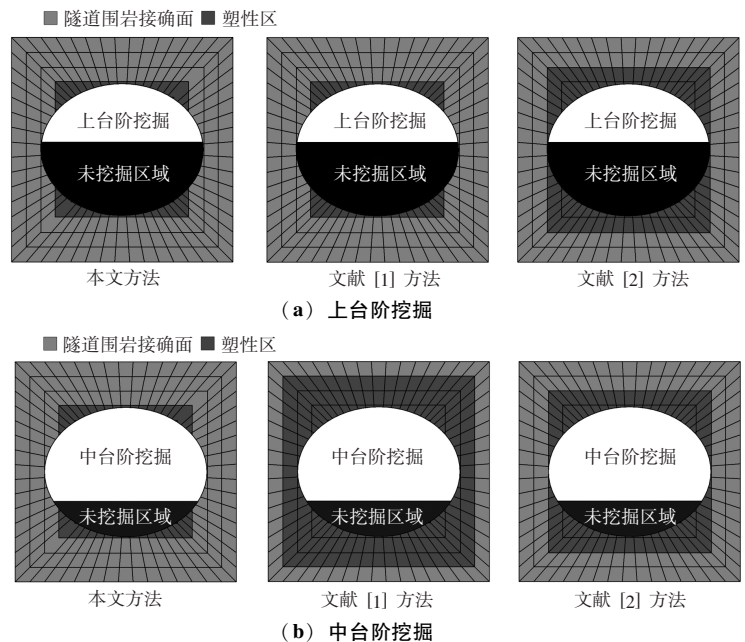
由图4可知,在初期支护,各平面的隧道沉降位移并不明显,隧道围岩接触面连接紧密,未出现断面拱顶或拱脚移位,说明本文方法对围岩的约束能力较强,可以保证隧道初期支护阶段施工人员的安全。这是因为本文方法在设计支护结构前,优先建立初期支护材料本构模型,并分析锚杆应力和钢架应力与围岩压力的应变关系。观察围岩变形过程方法和数值模拟方法在初期支护下各平面的隧道沉降位移明显,不仅隧道围岩接触面出现多处净空,断面拱顶或拱脚也出现位移变形,说明观察围岩变形过程方法和数值模拟方法对围岩的约束能力较差,易造成隧道变形和坍塌。根据上述对比,可知本文方法对围岩的约束能力优于其他两种方法。

3.2 塑性区分布

软土地层隧道围岩分区初期的工作内容包括上台阶挖掘、中台阶挖掘及下台阶挖掘。分别采用本文方法、观察围岩变形过程方法和数值模拟方法进行试验,设计支护结构,并模拟强震感地表运动。通过对比不同方法的塑性区分布,判断不同方法的初期支护效果。不同方法的塑性区分布如图5所示。随着隧道不断地挖掘,本文方法在遭受强震感冲击后的塑性区分布面积较小,而观察围岩变形过程方法和数值模拟方法的塑性区分布面积较大。由此可知,本文方法在软土地层隧道的抗震能力较其他两种方法强。

3.3 初期支护钢架连接件接触应力

采用本文方法、观察围岩变形过程方法和数值模拟方法进行试验,通过对比不同方法的初期支护钢架连接件接触应力,判断不同方法的初期支护效果。不同方法的初期支护钢架连接件接触应力随时间变化曲线如图6所示。钢架连接件接触应力随时间发展也存在一个“急剧增大→增大放缓→趋



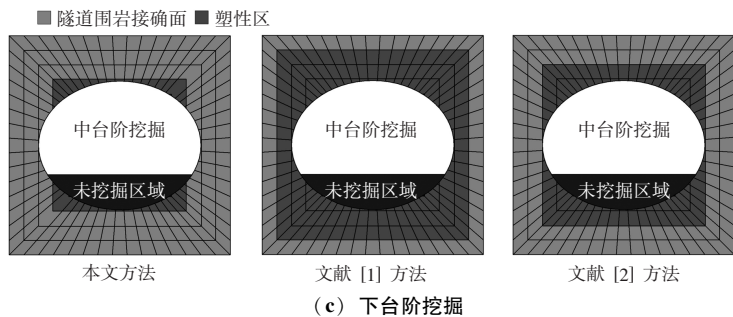


图 5 不同方法的塑性区分布

Fig. 5 Distribution of plastic zones using different methods

于稳定”的演化过程，只是阶段性不明显，且钢架连接件接触应力的急剧增大阶段通常在 30 d 左右，甚至更长

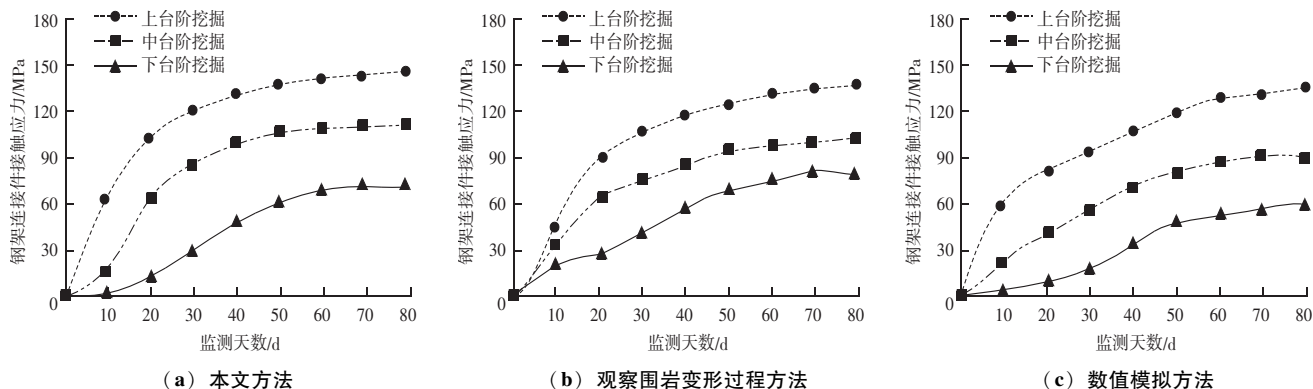


图 6 初期支护钢架连接件接触应力随时间变化曲线

Fig. 6 Contact stress variation curve of initial support steel frame connectors with time

4 结论

为避免和控制软土隧道开挖过程中出现的坍塌变形险情，提升围岩稳定性，保证施工安全，提出软土层隧道围岩分区初期支护技术，得到以下结论：

(1) 分区初期技术对围岩的约束能力较好，分区初期支护后各平面的隧道沉降位移较小。

(2) 分区初期技术在遭受强震感冲击后的塑性区分布面积较小，抗震能力较强。

(3) 分区初期技术的钢架连接件接触应力性能较好，能够有效提升围岩稳定性。

参考文献

[1] 王睿, 党发宁, 王靖媛, 等. 基于松动圈理论的隧道初期支护

时间。同时，由于钢材对围岩压力作用的敏感性较强，挖掘中下台阶时，钢架的悬空作用会引起钢架连接件接触应力较大的变化。因此，下台阶挖掘对钢架乃至整个初期支护的稳定性都十分重要。

台阶挖掘方法所测钢架连接件接触应力较大，最大值出现在上台阶挖掘阶段，其值为 145.45 MPa，文献 [1] 方法和文献 [2] 方法所测钢架连接件接触应力最大值分别为 135.65 MPa 和 136.72 MPa。表明在相同挖掘条件下，本文方法的钢架连接件接触应力性能优于其他两种对比方法，能够更加有效地提升围岩稳定性。

时机分析 [J]. 人民长江, 2021, 52 (7): 141-147.

[2] 黄启贵, 陈慧伟, 胡俊. 高海拔地区贯穿破碎带涌水涌泥地段隧道初期支护体系及开挖方法研究 [J]. 公路, 2022, 67 (7): 441-444.

[3] 林波, 谢文博, 刘磊, 等. 平面交叉隧道围岩及初期支护结构稳定性研究 [J]. 公路交通科技, 2022, 39 (7): 115-122.

[4] 王赶, 杜建明, 房倩, 等. 水平地震力作用下浅埋偏压小净距隧道围岩压力计算方法研究 [J]. 铁道标准设计, 2021, 65 (9): 133-139.

[5] 梁雨, 梅国雄, 蒋明杰, 等. 土压力盒标定试验研究及工程应用 [J]. 广西大学学报 (自然科学版), 2021, 46 (2): 245-252.

[6] 董建军, 郑高阳, 杨婧. 锚杆支护回采巷道安全监测用 FBG 锚杆研究 [J]. 采矿与安全工程学报, 2022, 39 (2): 328-334.