

DOI: 10.7672/sgjs2026030071

考虑围岩蠕变效应的铣挖法隧道施工变形控制研究*

徐占军¹, 张威振¹, 邹魁¹, 黄振华¹, 傅鹤林²

(1. 湖南中大设计院有限公司, 湖南 长沙 410075; 2. 中南大学土木工程学院, 湖南 长沙 410075)

[摘要] 为解决软岩浅埋小净距水下隧道铣挖法施工变形控制问题, 开展单轴压缩蠕变试验, 厘清不同含水状态下泥质粉砂岩蠕变特性。根据泥质粉砂岩蠕变试验数据, 采用 Cvisc 蠕变本构模型拟合应力-应变关系, 并标定本构参数。通过建立考虑岩体蠕变的数值模型揭示隧道受力与变形特征, 并在此基础上优化先后行洞开挖步距、二次衬砌施作时机, 将数值模拟结果与现场监测数据进行对比验证。研究表明, 饱和状态下泥质粉砂岩强度下降, 更易产生蠕变变形; Cvisc 模型计算结果更有利于保证施工安全性, 更符合围岩力学特性; 不同先后行洞开挖步距和二次衬砌滞后施工距离下初期支护混凝土强度均满足施工安全要求, 隧道拱顶沉降规律较接近, 且拱顶沉降对于先后行洞开挖步距和二次衬砌滞后施工距离的参数敏感性最高, 其次依次为拱肩沉降、拱腰沉降、拱底沉降、拱脚沉降; 增大先后行洞开挖步距、减小二次衬砌滞后施工距离可有效增强隧道稳定性, 控制拱顶沉降; 最优先后行洞开挖步距为 39m, 最优二次衬砌滞后施工距离为 9m; Cvisc 模型模拟得到的隧道拱顶沉降与监测值误差较小, 且变化趋势基本一致, 围岩变形最终达到收敛状态。

[关键词] 隧道; 围岩; 衬砌; 蠕变; 沉降; 数值模拟

[中图分类号] U455

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2026)03-0071-08

Study on Deformation Control in Tunnel Construction Using the Roadheader Considering the Creep Effect of Surrounding Rock

XU Zhanjun¹, ZHANG Weizhen¹, ZOU Kui¹, HUANG Zhenhua¹, FU Helin²

(1. Hunan Zhongda Design Institute Co., Ltd., Changsha, Hunan 410075, China;

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

Abstract: To address the deformation control challenge in the shallow-buried underwater tunnel with small clearances in soft rock excavated by roadheader, uniaxial creep tests were performed to examine the creep behavior of mudstone siltstone under varying moisture conditions. Based on the experimental results, the Cvisc creep constitutive model was adopted to fit the stress-strain relationship, and the constitutive parameters were calibrated accordingly. A numerical simulation model with rock mass creep was developed to investigate the stress and deformation characteristics of the tunnel. Using this model, the excavation sequence distance and timing of secondary lining installation were optimized. The results were then validated by comparison with field monitoring data. The research results show that under saturated conditions, the strength of mudstone siltstone decreases, making it more susceptible to creep deformation. The Cvisc model provides better agreement with the mechanical behavior of the surrounding rock and ensures higher construction safety. Under different excavation sequence distance and secondary lining delay distance, the strength of the initial support concrete meets the safety requirements, and the vault settlement patterns are generally similar. The tunnel vault settlement exhibits the highest sensitivity to excavation sequence distance and secondary lining delay distance, followed by the settlements at the shoulder, waist, invert and foot of the tunnel. Increasing the excavation sequence distance and reducing the secondary lining delay distance effectively enhance tunnel stability and control vault settlement. The optimal excavation sequence distance and secondary lining delay distance are determined to be 39m and

* 国家自然科学基金(52478424); 中南大学-湖南中大设计院有限公司工程建设设计信息化技术研发中心开放课题(KJ-2025-01)

[作者简介] 徐占军, 正高级工程师, E-mail: 244801010@csu.edu.cn

[收稿日期] 2025-10-10

9m, respectively. The vault settlement simulated using the Cvisc model shows minimal deviation from the monitored values, with consistent trends, indicating that the surrounding rock deformation eventually converges.

Keywords: tunnels; surrounding rock; lining; creep; settlement; simulation

0 引言

在水下隧道施工过程中,需有效控制施工变形,确保结构安全。传统钻爆法虽应用广泛,但其对隧道周边环境的扰动较大,可能导致周围岩体剧烈变形,破坏结构稳定性。而铣挖法作为机械开挖技术,相比传统钻爆法,具有对隧道周边环境扰动较小的优势,但其掘进速度低于钻爆法,导致隧道围岩裸露时间增加,进而可能加剧施工过程中的围岩蠕变效应。

已有学者对软岩隧道施工变形控制开展了大量研究,如郭新新等^[1]依托木寨岭公路隧道,通过M-C模型和Cvisc模型计算隧道典型断面变形,对比分析2种模型预测效果,揭示了岩体蠕变参数、围岩等级对围岩变形的影响规律;杨霖霖等^[2]依托华丽高速东马场1号隧道,基于泥质粉砂岩单轴压缩蠕变试验,建立隧道施工蠕变有限元模型,厘清了二次衬砌支护时间、开挖台阶长度、初期支护封闭时间对隧道支护效果的影响规律;郭小龙等^[3]依托某千枚岩隧道工程,基于现场变形监测数据,采用指数函数拟合隧道变形时程曲线,从而优化软岩隧道二次衬砌施作时机;Hu等^[4]依托某粉砂质泥岩隧道,开展单轴压缩蠕变试验获取相应蠕变参数,并建立了有限元模型,揭示隧道运营期间的蠕变力学与变形特征;Zhu等^[5]以某软岩巷道施工为研究背景,通过数值模拟分析不同断面形式、支护结构类型和参数对巷道稳定性的影响规律,确定最优巷道断面和支护方法;Wang等^[6]考虑长期蠕变损伤和瞬时扰动损伤,基于卡恰诺夫损伤理论和弹性波理论提出了三维损伤蠕变模型,编码于FLAC 3D软件中,建立了隧道开挖有限差分模型,提高了数值模拟结果的准确性。

多数学者通过岩体蠕变试验获取蠕变参数,并基于数值模拟揭示隧道受力及变形特征,然而考虑岩体含水状态对蠕变特性的影响及开挖步序时间精确性研究较少。为此,本文以赣州市蓉江四路过江隧道工程为依托,采用单轴压缩蠕变试验,探讨不同含水状态下泥质粉砂岩蠕变特性,并通过机器学习算法,确定了悬臂式掘进机瞬时切割速率,从而明确了隧道开挖步序时间,提高了数值模拟准确性。建立铣挖隧道数值模型,比较了蠕变模型与传统弹塑性模型精度差异,厘定了最优先后行洞开挖步距、最优二次衬砌施作时机,以实现隧道施工变形的精确控制,使其满足规范要求。

1 工程概况

赣州市蓉江四路过江隧道(简称蓉江隧道)为江西省第1条矿山法施工过江隧道,起点位于客家大道西延以南,终点位于黄金路以北,全长约2.412km。东洞(左洞)隧道长1745m,暗挖段长949.5m;西洞(右洞)隧道长1739m,暗挖段长953m。隧道暗挖段采用复合式衬砌,相邻两侧结构外边缘净距4.0~20.0m,设计采用3车道。隧道全线为V级围岩,主要穿越地层为中风化泥质粉砂岩,如图1所示。隧道断面面积为135m²,属于大断面隧道。隧道埋深浅,全线最大埋深10.87m,全线均为小净距,现场采用铣挖法施工。

2 岩体蠕变特性分析

2.1 单轴压缩蠕变试验

蓉江隧道所处河底岩石处于水饱和状态,而泥质粉砂岩力学性质往往受含水率影响,为揭示泥质粉砂岩不同含水状态下的蠕变特性,分别开展自然状态、饱和状态下的单轴压缩蠕变试验(见图2)。利用RMT-150C型岩石力学试验系统加载,采用分

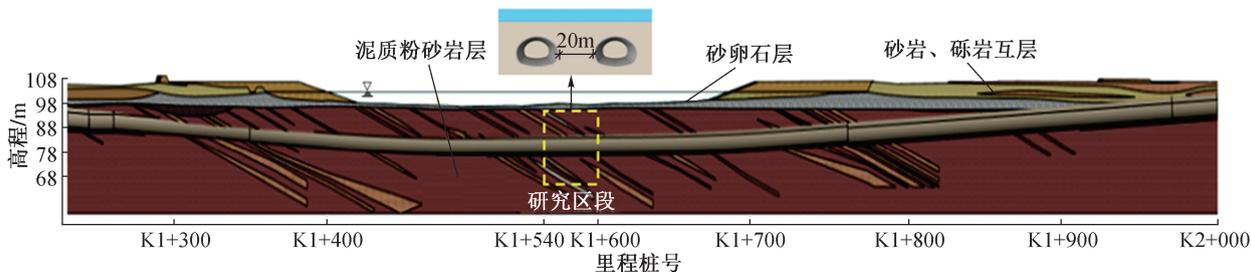


图1 隧道穿越地层

Fig. 1 Strata crossed by the tunnel

级加载方式,加载速度为 0.1MPa/s,加载至该级别荷载时保持荷载大小不变,每级加载时间为 48h,逐级加载至岩体破坏,通常蠕变试验荷载为岩体单轴压缩强度的 40%~90%^[7],自然状态、饱和状态下的泥质粉砂岩单轴压缩强度分别为 41.0,24.3MPa。



图 2 单轴压缩蠕变试验试样与设备
Fig. 2 Uniaxial compression creep test specimens and equipment

根据陈氏叠加法^[8]得到泥质粉砂岩试样在不同荷载水平下的蠕变曲线,如图 3 所示,蠕变试验结果如表 1 所示。由图 3a 和表 1 可知,自然状态下试样在第 5 级荷载加载时发生破坏;试样在各级应力水平下的瞬时应变占比均>80%,说明岩体变形多

在加载瞬间产生;试样在前 3 级荷载加载时,即应力水平 $\leq 23\text{MPa}$ 时,表现为稳定蠕变,每级荷载作用下的蠕变速率随时间增加逐渐减小,总蠕变应变随应力水平增加而增大;从第 4 级荷载加载后,试样表现为不稳定蠕变,在减速、等速、加速蠕变阶段均产生了一定蠕变变形,且随应力水平增加,不稳定蠕变现象越来越明显;在 27MPa 应力水平阶段,加速蠕变应变占该阶段总蠕变应变的 16.8%,在 31MPa 应力水平阶段,加速蠕变应变占比增至 82.1%,说明加速蠕变应变、总蠕变应变均随应力水平增加而增大。

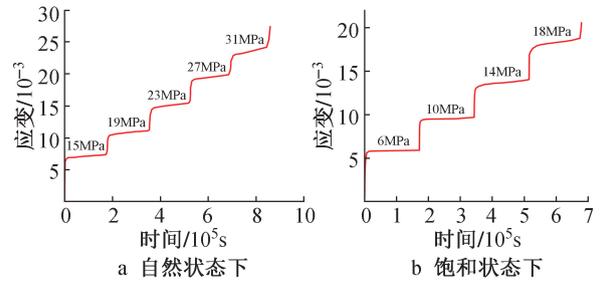


图 3 泥质粉砂岩蠕变曲线

Fig. 3 Creep curves of mudstone siltstone

由图 3b 和表 1 可知,饱和状态下泥质粉砂岩试样在第 4 级荷载加载时便发生了破坏;试样在不同应力水平下的瞬时应变占比均>88%,可知变形仍主要为加载瞬间产生;试样在前 2 级荷载加载时,即应力水平 $\leq 10\text{MPa}$ 时,表现为稳定蠕变,蠕变应变随应力水平增加而增大;从第 3 级荷载加载后,试样表现为不稳定蠕变,在减速、等速、加速蠕变阶段均产生了一定蠕变变形,且随应力水平增加,不稳定蠕变现象越来越明显;在 14MPa 应力水平阶段,加速蠕变应变占该阶段总蠕变应变的 6.5%,在 18MPa 应力水平阶段,加速蠕变应变占比增至 36.7%,说明加速蠕变应变、总蠕变应变均随应力水平增加而增大。

表 1 泥质粉砂岩蠕变试验结果

Table 1 Creep test results of mudstone siltstone

含水状态	应力水平/MPa	瞬时应变	减速蠕变应变	等速蠕变应变	加速蠕变应变	总应变	总蠕变应变	瞬时应变占比/%
自然状态	15	0.628	0.112	—	—	0.740	0.112	84.86
	19	0.950	0.158	—	—	1.108	0.158	85.74
	23	1.343	0.202	—	—	1.545	0.202	86.93
	27	1.780	0.147	0.081	0.046	2.054	0.274	86.66
	31	2.197	0.020	0.041	0.280	2.538	0.341	86.56
饱和状态	6	0.522	0.070	—	—	0.592	0.070	88.18
	10	0.862	0.090	—	—	0.952	0.090	90.55
	14	1.280	0.052	0.064	0.008	1.404	0.124	91.17
	18	1.729	0.048	0.059	0.062	1.898	0.169	91.10

饱和状态下泥质粉砂岩更易产生蠕变变形,由于蓉江隧道采用铣挖法施工,掘进速度较慢,增加了围岩裸露时间,因此有必要考虑施工阶段岩体蠕变效应带来的影响。

2.2 岩体蠕变本构参数标定

目前已有学者多通过各基本流变元件串联、并联的方式进行组合,从而表征土体黏弹塑性变形特性。常用的组合模型有 Maxwell, Kelvin, Burgers, Cvisc 模型等^[9]。其中, Cvisc 模型由 Burgers 蠕变模型和莫尔-库仑塑性模型串联而成,适用于表征泥质粉砂岩等软弱岩体变形特性^[10],本文采用该模型进行分析。通过 Origin 软件自带的 Levenberg-Marquardt 优化算法对泥质粉砂岩蠕变试验数据进行拟合,蠕变本构参数如表 2 所示。

3 考虑岩体蠕变效应的隧道施工数值模拟

3.1 计算模型建立

为保证水下隧道施工安全,选取 K1+540—K1+600 暗挖水域段作为研究区段,采用 FLAC 3D 6.0 软件建立铣挖隧道开挖模型,模拟施工力学行为。隧道断面宽度为 15.6m,高度为 10.7m,属于大断面隧道,为控制围岩变形,采用 CD 法分部开挖。根据圣维南原理,模型左右侧到隧道的距离取隧道直径 3~5 倍,从而减小边界条件对计算准确度的影响^[11],上覆土层按实际情况取值,覆土厚度为 9.8m,静水压力为 100kPa,确定模型尺寸为 140m×60m×70m(长×宽×高),如图 4 所示,以 $y=30\text{m}$ 断面作为监测断面。

为分析施工阶段围岩蠕变对支护结构受力、变形特征的影响,分别给土体赋予 Cvisc 蠕变本构参数、莫尔-库仑弹塑性本构参数,进行对比分析。初期支护及临时支撑采用实体单元模拟,二次衬砌采

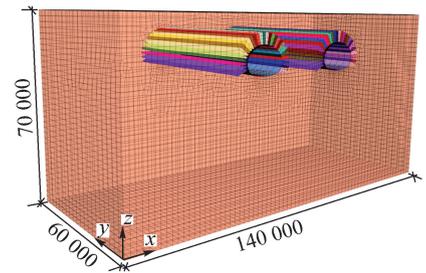


图 4 有限差分模型

Fig. 4 Finite difference model

用壳单元模拟,锚杆采用软件自带的锚索单元模拟。初期支护包含厚度为 0.3m 的 C30 湿喷混凝土、长度为 4m 的水泥砂浆锚杆(环间间距分别为 1 000,600mm),二次衬砌采用 C40 模筑混凝土,临时支撑采用钢拱架,材料物理力学参数如表 3 所示。

土体采用莫尔-库仑弹塑性本构模拟时,可通过设置分析步计算规则计算每步开挖后的模型受力状态,如设置分析步“时间”,而分析步“时间”并未和真实时间对应,仅作为描述软件分析步计算尺度的物理量^[12]。但考虑土体蠕变效应时,分析步“时间”会作为土体蠕变的真实时间,因此有必要确定开挖步序、支护步序的真实时间。其中,开挖步序时间由悬臂式掘进机掘进速度确定,笔者研究团队已通过机器学习算法建立了悬臂式掘进机瞬时切割速率预测系统^[13],如图 5 所示,平均开挖步序速度为 9.7h/m,通过统计现场平均支护时间确定平均支护步序速度为 16.2h/m。

3.2 边界条件与分析步设置

1) 边界条件

模型前后左右侧面设置为法向位移约束,下表面设置为完全约束,上表面为自由面。

2) 分析步

表 2 泥质粉砂岩蠕变本构参数

Table 2 Creep constitutive model parameters for mudstone siltstone

含水状态	Maxwell 模型弹性模量 E_1/GPa	Kelvin 模型弹性模量 E_2/GPa	Maxwell 模型黏滞系数 $\eta_1/(\text{GPa} \cdot \text{h})$	Kelvin 模型黏滞系数 $\eta_2/(\text{GPa} \cdot \text{h})$
自然状态	15.68	22.82	1 136.11	1.04
饱和状态	2.46	12.71	300.46	1.45

表 3 材料物理力学参数

Table 3 Physical and mechanical parameters of materials

材料	密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	弹性模量/GPa	泊松比	黏聚力/kPa	内摩擦角/ $(^\circ)$
泥质粉砂岩	2 550	2.6	0.38	420	23.6
初期支护	2 250	30.0	0.30	—	—
二次衬砌	2 250	32.5	0.20	—	—
锚杆	7 850	210.0	0.22	—	—
临时支撑	3 300	90.0	0.23	—	—

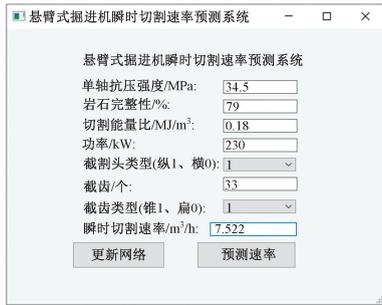


图5 悬臂式掘进机瞬时切割速率预测系统

Fig. 5 Prediction system for instantaneous cutting rate of cantilever roadheader

2种模型土体本构、分析步时间不同,其他设置如单元属性、边界条件、开挖支护步序均相同。分析步①为地应力平衡,仅保留土体单元,施加重力及静水压力,求解模型直至位移 $<1 \times 10^{-5} \text{m}$,认为此时达到地应力平衡。分析步②为分部开挖,考虑蠕变时土体采用饱和状态下的 C_{visc} 蠕变本构,采用 null model 命令将待开挖土体单元设置为空模型,模拟隧道开挖;未考虑蠕变时土体采用莫尔-库仑本构,分析步时长采用默认时长,其他设置不变。分析步③为分部支护,考虑蠕变时“激活”支护单元,“杀死”部分临时支撑单元,模拟隧道初期支护、二次衬砌和锚杆支护力学行为;未考虑蠕变时分析步时长采用默认时长,其他设置不变。分析步④为按前述 CD 法开挖步骤,重复分析步②,③直至隧道开挖支护完成,其中 CD 法台阶长度为 3m(见图 6),为便于计算,数值模拟中循环开挖步距设置为 3m。

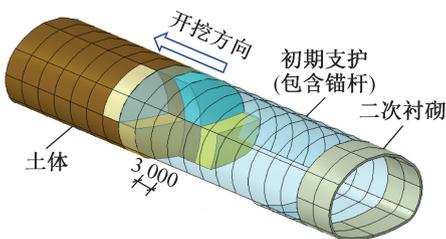


图6 CD法开挖示意

Fig. 6 Excavation by CD method

3.3 计算工况设置

现场施工时右洞为先行洞,当右洞开挖至一定步距时进行左洞开挖。针对蓉江隧道小净距的特点,如果先后行洞开挖步距过小,会增大两洞间的相互影响;如果先后行洞开挖步距过大,会延长工期,增加施工成本。因此,需厘定最优先后行洞开挖步距。针对软岩隧道蠕变特点,二次衬砌施作时机往往是控制围岩蠕变的有效方式^[3]。为优化蓉江隧道开挖支护参数,控制隧道洞周变形,针对先

后行洞开挖步距,考虑4种工况,即先后行洞开挖步距分别取12,21,30,39m;相应的,将二次衬砌支护时机转换为滞后施工距离表示,即设置滞后施工距离分别为3,9,15,21m,如图7所示。当初期支护施作完成后,随即施作二次衬砌,保持滞后施工距离不变。

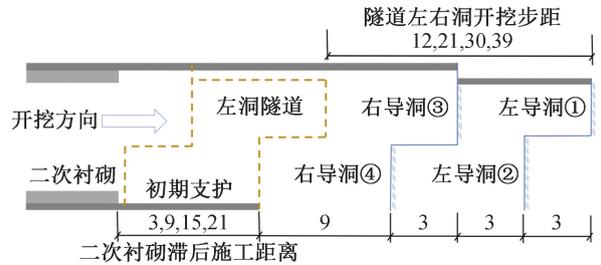


图7 计算工况示意(单位:m)

Fig. 7 Calculation conditions(unit:m)

3.4 典型工况计算结果分析

以先后行洞开挖步距39m、二次衬砌滞后施工距离9m作为典型工况,对比分析采用莫尔-库仑和 C_{visc} 模型土体变形受力特征和塑性区分布。参考 GB 50086—2015《岩土锚杆与喷射混凝土支护工程技术规范》,V级围岩下埋深 $<50 \text{m}$ 的隧道初期支护极限相对位移须满足0.2%的限值,即规范允许的蓉江隧道最大拱顶沉降、最大水平位移分别为21.4,31.2mm。

塑性区分布情况可反映围岩稳定状态,当隧道开挖完成时,2种本构模型计算结果如图8所示。由图8可知,隧道洞周围岩以剪切破坏为主, C_{visc} 模型计算所得塑性区面积为 102m^2 ,莫尔-库仑模型计算所得塑性区面积为 75m^2 ,减少了26.5%,且由于岩体蠕变效应,洞周围岩变形逐渐增大,拱底岩体由于受到两边岩体挤压发生剪拉破坏,且左右洞塑性区贯通。

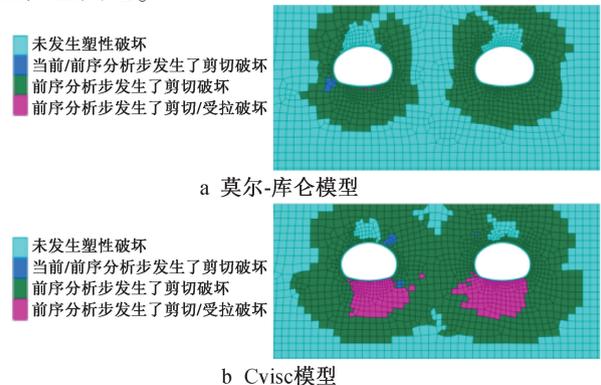


图8 不同本构模型塑性区对比

Fig. 8 Comparison of plastic zone of the different constitutive models

隧道土体竖向位移及衬砌应力云图分别如图 9,10 所示。由图 9,10 可知,莫尔-库仑模型、Cvisc 模型计算得到的土体最大竖向位移分别为 10.8, 17.6mm,最大初期支护应力分别为 6.8,8.3MPa。莫尔-库仑模型由于未考虑隧道施工时间效应对土体变形的影响,主要反映了即时应力重分布结果,因此得到的土体位移、衬砌应力计算结果偏小,对于施工而言偏于危险。而 Cvisc 模型计算得到的土体变形和衬砌应力不仅取决于开挖和支护步序的推进,且与时间紧密相关,计算结果更有利于保证施工安全性,更符合围岩力学特性,因此本文后续分析均采用 Cvisc 模型。岩体施工阶段蠕变效应对围岩稳定分析会产生较大影响,因此有必要考虑软岩隧道施工阶段的蠕变特性。

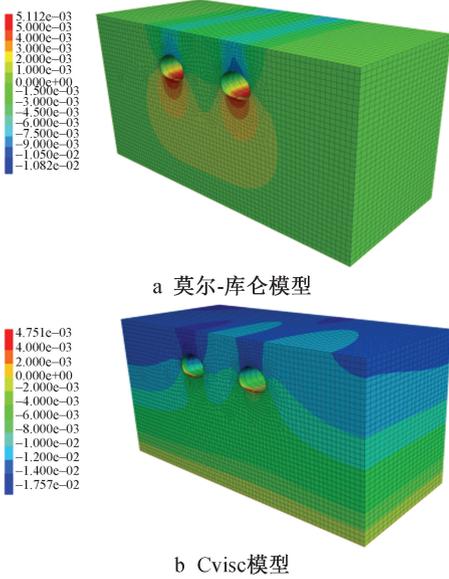


图 9 土体竖向位移云图(单位:m)

Fig. 9 Vertical displacement cloud maps of soil (unit:m)

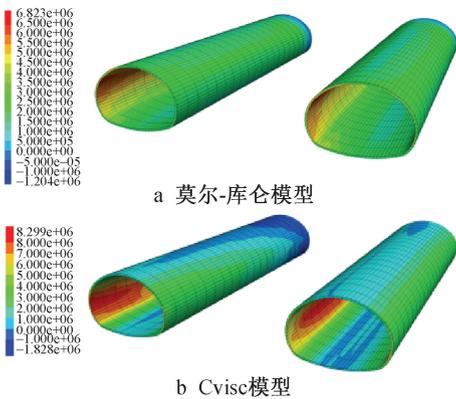


图 10 初期支护 Mises 应力云图(单位:Pa)

Fig. 10 Mises stress cloud maps of initial support(unit:Pa)

3.5 最优先后行洞开挖步距分析

为得到最优先后行洞开挖步距,设置二次衬砌

滞后施工距离保持 9m 不变,分别考虑先后行洞开挖步距为 12,21,30,39m,对应的右洞监测断面拱顶沉降曲线如图 11 所示,右洞围岩最终位移(竖向位移和水平位移的矢量和)曲线如图 12 所示。

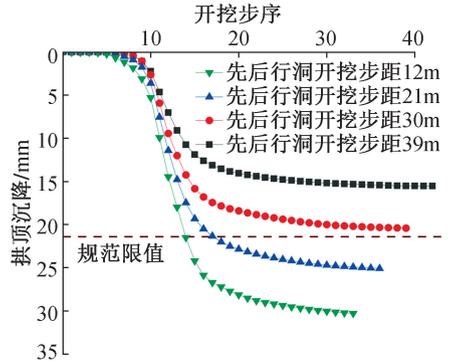


图 11 不同先后行洞开挖步距下监测断面拱顶沉降

Fig. 11 Vault settlement curves of the monitoring section by different excavation sequence distance

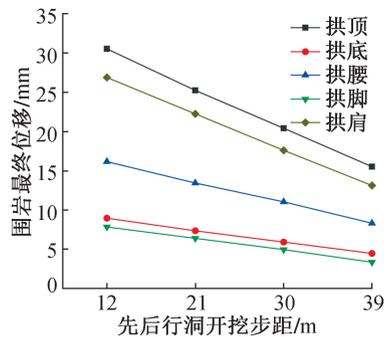


图 12 不同先后行洞开挖步距下监测断面洞周位移

Fig. 12 Tunnel peripheral displacement curves of the monitoring section by different excavation sequence distance

由图 11 可知,不同先后行洞开挖步距下,隧道拱顶沉降规律较接近,先后行洞开挖步距的减小导致拱顶开始沉降的时间提前,同时沉降速率有所加快,导致沉降衰减时间延长,最终拱顶沉降增加。这是由于在先行洞支护尚未封闭成环时,后行洞开挖会加剧围岩扰动,从而增大围岩压力,因此现场施工时应使左右洞保持足够步距,待先行洞支护成环且保持一定距离后再开挖后行洞,从而有效控制支护结构变形和应力,保证施工安全。

由图 12 可知,不同先后行洞开挖步距下,拱顶位移>拱肩位移>拱腰位移>拱底位移>拱脚位移,其中拱顶沉降对于先后行洞开挖步距的参数敏感性最高,其次依次为拱肩沉降、拱腰沉降、拱底沉降、拱脚沉降;当先后行洞开挖步距为 12,21m 时拱顶沉降不满足规范要求,增大先后行洞开挖步距可有效控制拱顶沉降。

不同先后行洞开挖步距下隧道初期支护应力如图 13 所示。由图 13 可知,不同先后行洞开挖步距下,初期支护拱顶、拱肩、拱腰、拱脚、拱底应力分布状态较相似,拱脚应力>拱肩应力>拱腰应力>拱顶应力>拱底应力;随着先后行洞开挖步距的减小,初期支护应力逐渐增大,拱脚处应力变化最明显。这是由于随着先后行洞开挖步距的增加,先后行洞开挖对彼此的扰动程度降低。初期支护 C30 混凝土轴心抗压强度设计值为 14.3MPa,可知不同先后行洞开挖步距下,初期支护混凝土强度满足施工安全要求。

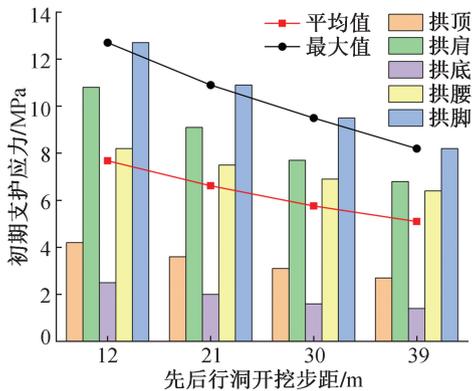


图 13 不同先后行洞开挖步距下初期支护应力
Fig. 13 Stress of initial support by different excavation sequence distance

综上所述,当先后行洞开挖步距 ≥ 30 m时,隧道变形及受力满足规范要求。由于先后行洞开挖步距为 30m 时,拱顶沉降最大值已达到规范限值的 95%,出于安全储备考虑,将最优先后行洞开挖步距控制为 39m。

3.6 最优二次衬砌施作时机分析

确定最优先后行洞开挖步距为 39m,在此基础上分析不同二次衬砌滞后施工距离对支护变形及受力的影响,结果如图 14, 15 所示。由图 14 可知,不同二次衬砌滞后施工距离下,隧道拱顶沉降规律较接近,随着二次衬砌滞后施工距离的减小,最大拱顶沉降逐渐减小,同时拱顶沉降收敛随之提前^[14]。这是由于二次衬砌尽早施作可有效增加结构支护刚度,进而有效抑制由于蠕变引起的变形,减小最终拱顶沉降。

由图 15 可知,不同二次衬砌滞后施工距离下,拱顶位移>拱肩位移>拱腰位移>拱底位移>拱脚位移,其中拱顶沉降对于二次衬砌滞后施工距离的参数敏感性最高,其次依次为拱肩沉降、拱腰沉降、拱底沉降、拱脚沉降;二次衬砌滞后施工距离为 15, 21m 时拱顶沉降不满足规范要求,二次衬砌滞后施

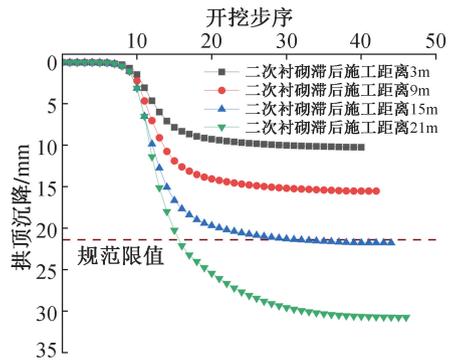


图 14 不同二次衬砌滞后施工距离下监测断面拱顶沉降
Fig. 14 Vault settlement curves of the monitoring section by different secondary lining delay distance

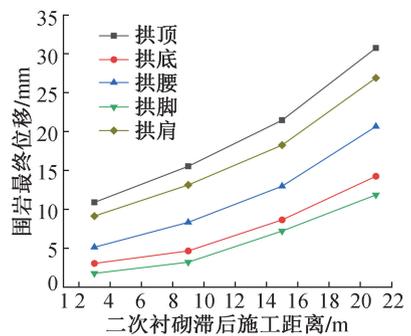


图 15 不同二次衬砌滞后施工距离下监测断面洞周位移
Fig. 15 Tunnel peripheral displacement curves of the monitoring section by different secondary lining delay distance

工距离降低可有效增强隧道稳定性,控制拱顶沉降。

不同二次衬砌滞后施工距离下隧道初期支护应力如图 16 所示。由图 16 可知,不同二次衬砌滞后施工距离下,初期支护拱脚应力>拱肩应力>拱腰应力>拱顶应力>拱底应力;随着二次衬砌滞后施工距离的减小,初期支护应力整体呈下降趋势,拱脚处应力变化最明显,这是由于二次衬砌尽早施作可有效控制软岩隧道蠕变,减小围岩压力。此外,二次衬砌可与初期支护共同承载围岩压力,从而减小初期支护应力。不同二次衬砌滞后施工距离下,初期支护混凝土强度满足施工安全要求。

综上所述,考虑铣挖隧道现场施工时悬臂式掘进机作业空间及渣土临时堆放空间需求^[15],将最优二次衬砌滞后施工距离确定为 9m。

3.7 现场监测对比分析

Cvise 模型模拟值与现场监测值对比如图 17 所示。由图 17 可知,左右洞最大拱顶沉降监测值分别为 12.8, 16.6mm; Cvise 模型模拟值与监测值误差较小,且变化趋势基本一致,隧道开挖后拱顶沉降快速增长一段时间,随后进入衰减阶段,随着仰拱封

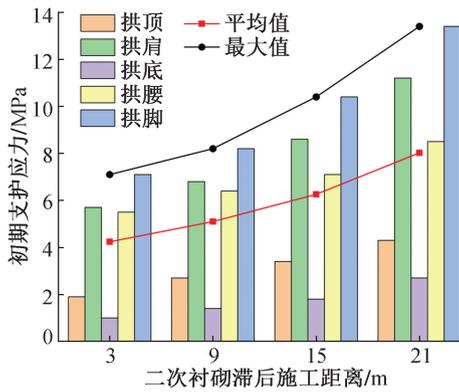


图 16 不同二次衬砌滞后后施工距离下初期支护应力

Fig. 16 Stress of initial support by different secondary lining delay distance

闭和二次衬砌施作完成,隧道拱顶沉降逐渐趋于收敛,沉降速率 $<0.1\text{mm/d}$ 。

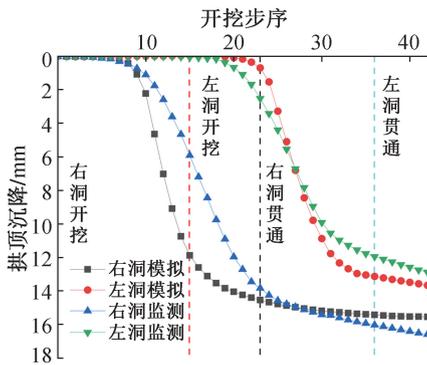


图 17 拱顶沉降模拟值与监测值对比

Fig. 17 Simulated and monitored values of vault settlement

4 结语

1) 自然状态、饱和状态下泥质粉砂岩试样分别在第 5,4 级荷载加载时发生破坏,饱和状态下泥质粉砂岩强度下降,更易产生蠕变变形。

2) C_{visc} 模型考虑隧道施工时间效应,计算结果更有利于保证施工安全性,且更符合围岩力学特性。

3) 当先后行洞开挖步距 $\geq 30\text{m}$ 时,隧道变形及受力满足规范要求,出于安全储备考虑,将先后行洞开挖步距控制为 39m。

4) 当二次衬砌滞后后施工距离为 15,21m 时,拱顶沉降不满足规范要求,考虑铣挖隧道现场施工时悬臂式掘进机作业空间及渣土临时堆放空间需求,将二次衬砌滞后后施工距离确定为 9m。

5) 基于 C_{visc} 模型的拱顶沉降模拟值与现场监测值误差较小,且变化趋势基本一致,随着仰拱封闭和二次衬砌施作完成,隧道洞周沉降逐渐稳定。

参考文献:

[1] 郭新新,汪波,王振宇,等.考虑蠕变特性的高应力软岩隧道变形预测方法与实践[J].岩土工程学报,2023,45(3):

652-660.

GUO X X, WANG B, WANG Z Y, et al. Methods and practices for deformation prediction in high-stress soft rock tunnels considering creep characteristics [J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2023, 45 (3) : 652-660.

[2] 杨林霖,杨文波,田浩晟,等.考虑围岩短期蠕变效应的隧道双层初期支护变形控制研究[J].岩石力学与工程学报,2023,42(7):1731-1742.

YANG L L, YANG W B, TIAN H S, et al. Study on deformation control of double-layered initial support in tunnels considering short-term creep effects of surrounding rock [J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2023, 42 (7) : 1731-1742.

[3] 郭小龙,谭忠盛,李磊,等.高地应力千枚岩隧道二次衬砌施作时机研究[J].中国公路学报,2020,33(12):249-261.

GUO X L, TAN Z S, LI L, et al. Study on the construction time of secondary lining in phyllite tunnel under high geo-stress [J]. China journal of highway and transport, 2020, 33 (12) : 249-261.

[4] HU A K, ZHOU S, WU M K, et al. Modified rheological model for deep-buried silty mudstone and support time analysis application [J]. Mathematical problems in engineering, 2023 (1) : 3124359.

[5] ZHU X G, YANG S, XIA H C, et al. Joint support technology and its engineering application to deep soft rock tunnel with strong creep [J]. Geotechnical and geological engineering, 2020, 38 (4) : 3403-3414.

[6] WANG G F, SUN F, XIONG X H, et al. A 3D creep model considering disturbance damage and creep damage and its application in tunnel engineering [J]. Mathematical problems in engineering, 2020 (1) : 7073089.

[7] 陈志,贾朝军,雷明锋.软弱结构面岩体剪切蠕变试验研究[J].铁道科学与工程学报,2021,18(7):1817-1827.

CHEN Z, JIA C J, LEI M F. Experimental investigation on shear creep properties of natural structural plane [J]. Journal of railway science and engineering, 2021, 18 (7) : 1817-1827.

[8] 徐鹏,杨圣奇.复合岩层三轴压缩蠕变力学特性数值模拟研究[J].采矿与安全工程学报,2018,35(1):179-187.

XU P, YANG S Q. Numerical analysis of creep mechanical property for bedded composite rock [J]. Journal of mining and safety engineering, 2018, 35 (1) : 179-187.

[9] 熊良宵,汪子华.中国近 20 年岩石流变试验与本构模型的研究进展[J].地质灾害与环境保护,2018,29(3):104-112.

XIONG L X, WANG Z H. Progress in study on rheological test and rheological model of rock for nearly 20 years in China [J]. Journal of geological hazards and environment preservation, 2018, 29 (3) : 104-112.

[10] 叶为民,王启力,罗文静,等.非饱和泥质粉砂岩蠕变特性及其模型[J].同济大学学报(自然科学版),2022,50(8):1154-1162.

YE W M, WANG Q L, LUO W J, et al. Compressive creep property and model for unsaturated argillaceous siltstone [J]. Journal of Tongji University (natural science), 2022, 50 (8) : 1154-1162.

(下转第 133 页)

- QI S, FENG X X, LI C F, et al. Study and application of intelligent temperature control system for mass concrete structure construction [J]. *Building construction*, 2025, 47 (9): 1365-1368, 1378.
- [3] 赵文斌, 赵永鹏, 刘建勋. 低温、大温差地区预制混凝土箱梁养护制度研究[J]. *混凝土与水泥制品*, 2020(8): 38-42.
- ZHAO W B, ZHAO Y P, LIU J X. Study on steam maintenance technology of precast concrete box girder at low temperature and large temperature difference area[J]. *China concrete and cement products*, 2020(8): 38-42.
- [4] SHOUKRY S N, WILLIAM G W, DOWNIE B, et al. Effect of moisture and temperature on the mechanical properties of concrete [J]. *Construction and building materials*, 2011, 25(2): 688-696.
- [5] 皮进勇. 高寒地区水工混凝土冬季施工关键技术及质量控制[J]. *水泥*, 2025(9): 149-151.
- PI J Y. Key technologies and quality control for water engineering concrete construction in cold regions in winter[J]. *Cement*, 2025(9): 149-151.
- [6] 陈芝琦, 王世平, 谢洪栋, 等. 智能混凝土喷淋养护系统及工程应用研究[J]. *施工技术(中英文)*, 2024, 53(22): 60-64.
- CHEN Z Q, WANG S P, XIE H D, et al. Research on intelligent concrete spray curing system and engineering application [J]. *Construction technology*, 2024, 53(22): 60-64.
- [7] 肖强, 姚丽敏. 船闸底板大体积混凝土裂缝控制技术研究[J]. *施工技术(中英文)*, 2025, 54(5): 127-131.
- XIAO Q, YAO L M. Control technology for cracking of large volume concrete in bottom slab of ship lock [J]. *Construction technology*, 2025, 54(5): 127-131.
- [8] ZEYAD A M, TAYEH B A, ADESINA A, et al. Review on effect of steam curing on behavior of concrete [J]. *Cleaner materials*, 2022, 3: 100042.
- [9] YANG Z H, XIE Y J, HE J H, et al. Experimental investigation on mechanical strength and microstructure of cement paste by electric curing with different voltage and frequency [J]. *Construction and building materials*, 2021, 299: 123615.
- [10] WADHWA S S, SRIVASTAVA L K, GAUTAM D K, et al. Direct electric curing of in-situ concrete [J]. *Batiment international, building research and practice*, 1987, 15: 97-101.
- [11] WILSON J G, GUPTA N K. Equipment for the investigation of the accelerated curing of concrete using direct electrical conduction [J]. *Measurement*, 2004, 35(3): 243-250.
- [12] 张冉, 张秀崧, 童富果, 等. 温度对混凝土比热容的影响试验研究[J]. *水利与建筑工程学报*, 2021, 19(2): 203-207.
- ZHANG R, ZHANG X S, TONG F G, et al. Experimental study on the influence of temperature on specific heat capacity of concrete [J]. *Journal of water resources and architectural engineering*, 2021, 19(2): 203-207.
- [13] HONORIO T, BARY B, BENBOUDJEMA F. Thermal properties of cement-based materials: multiscale estimations at early-age [J]. *Cement and concrete composites*, 2018, 87: 205-219.
- [14] PIRO N S, MOHAMMED A S, HAMAD S M. Electrical resistivity measurement, piezoresistivity behavior and compressive strength of concrete: a comprehensive review [J]. *Materials today communications*, 2023, 36: 106573.
- [15] TIAN Z, DUAN B D, NIU X L, et al. Establishment and experimental validation of a dynamic heat transfer model for concrete radiant cooling slab based on reaction coefficient method [J]. *Energy and buildings*, 2014, 82: 330-340.
- [16] ARYA C, SAIDSHAWQI Q, VASSIE P R W. Factors influencing electrochemical removal of chloride from concrete [J]. *Cement and concrete research*, 1996, 26(6): 851-860.
- [17] XIA J, LI T, FANG J X, et al. Numerical simulation of steel corrosion in chloride contaminated concrete [J]. *Construction and building materials*, 2019, 228: 116745.
- [18] 李耀翔. 大体积混凝土施工温控难题及应对策略[J]. *中国水泥*, 2025(5): 89-91.
- LI Y X. Problems and countermeasures of temperature control in mass concrete construction [J]. *China cement*, 2025(5): 89-91.
- [19] 路新瀛, 郭保林, 邵新鹏, 等. 混凝土耐久性在线监测(I): 混凝土电阻变化[J]. *混凝土世界*, 2015(8): 48-53.
- LU X Y, GUO B L, SHAO X P, et al. On-line monitoring of concrete durability (I): Concrete resistance change [J]. *China concrete*, 2015(8): 48-53.
- [20] 张蕊, 李金龙, 邓稚川, 等. 直接电养护对混凝土性能的影响[J]. *混凝土与水泥制品*, 2023(4): 54-58.
- ZHANG R, LI J L, DENG Z C, et al. Effect of direct electric curing on properties of concrete [J]. *China concrete and cement products*, 2023(4): 54-58.

(上接第 78 页)

- [11] 范未鹏. 软岩隧道开挖围岩变形与受力特征研究[J]. *施工技术(中英文)*, 2025, 54(9): 123-127.
- FAN W P. Study on deformation and stress characteristic of surrounding rock in soft rock tunnel excavation [J]. *Construction technology*, 2025, 54(9): 123-127.
- [12] 罗彦斌, 陈建勋. 黏弹性条件下大跨度公路黄土隧道二次衬砌施作时机[J]. *长安大学学报(自然科学版)*, 2021, 41(5): 86-95.
- LUO Y B, CHEN J X. Construction time of secondary lining of large span loess tunnel under viscoelasticity condition [J]. *Journal of Chang'an University (natural science edition)*, 2021, 41(5): 86-95.
- [13] 傅鹤林, 赵一博, 王立志, 等. 基于 PSO-SVR 算法的悬臂式掘进机工作性能预测[J]. *铁道工程学报*, 2024, 41(9): 92-98.
- FU H L, ZHAO Y B, WANG L Z, et al. Performance prediction of roadheader by PSO-SVR algorithm [J]. *Journal of railway engineering society*, 2024, 41(9): 92-98.
- [14] 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.
- [15] 王宁. 山岭长大隧道机械化施工及适应性改造技术研究[J]. *施工技术(中英文)*, 2025, 54(4): 60-66.
- WANG N. Research on mechanized construction and adaptive transformation technology of mountain long tunnel [J]. *Construction technology*, 2025, 54(4): 60-66.