

# Singh—Mitchell 蠕变模型在炭质岩隧道围岩 变形分析中的应用

刘卓华<sup>1</sup>, 黄小桂<sup>2</sup>, 骆俊晖<sup>2</sup>

(1. 广西交通投资集团有限公司, 广西南宁 530029; 2. 广西交通设计集团有限公司)

**摘要:**炭质岩是一种易崩解、软化、膨胀以及环境敏感的特殊性岩土,属于软弱岩,同时炭质岩隧道围岩的开挖变形、长期稳定性问题是炭质岩隧道建设所面临的共性问题。据此,对广西西北部山区某高速公路炭质岩隧道围岩位移、温度、渗压等指标进行监控量测,基于获得数据采用 Singh—Mitchell 模型研究围岩的蠕变机制,随后预测隧道通车前的围岩变形。结果表明:不考虑温度和渗压的条件下, Singh—Mitchell 蠕变模型能有效计算分析及预测隧道围岩变形发展规律,可为炭质岩隧道建设以及采取防治加固措施提供参考与借鉴。

**关键词:**炭质岩; 隧道; 围岩; 蠕变; Singh—Mitchell 模型

炭质岩大多呈黑色, 蕴含成分复杂, 属于黏土岩。除黏土矿物外, 还含许多碎屑矿物和自生矿物, 具有页状或薄片状层理, 其代表岩石有炭质泥岩、炭质页岩和炭质灰岩等, 具有易风化、低强度参数指标、遇水软化、膨胀性、环境敏感性、崩解性等工程特性, 属软弱岩, 易产生显著的塑性变形及蠕变, 在炭质岩隧道施工及运营中可能引起隧道衬砌的开裂变形。

广西山岭众多, 炭质岩分布广泛, 公路工程建设规划的隧道难免要穿越炭质岩地层, 而炭质岩岩体的变形往往具有累积性扩展和时间效应两大特征, 给施工建设造成极大的困难。广西已建成及在建高速公路分布着大量炭质岩, 炭质岩分布区隧道围岩的开挖变形、运营期稳定问题是广西区公路建设面临的最主要工程环境地质问题。为保证软弱破碎围岩隧道岩土工程施工安

全及长期稳定性, 需对炭质岩隧道围岩进行变形分析。

## 1 工程概况

广西西北部山区某高速公路炭质岩隧道, 为分离式长隧道, 该隧道区属中低山峰林地貌, 地形起伏较大。隧道范围内中线高程为 642.5~769.6 m, 最大高差约为 127.1 m。隧道进洞口端自然斜坡坡度为 30°~45°, 局部见强风化岩层出露。出洞口一侧斜坡相对较缓, 坡度为 20°~30°, 斜坡表面为第四系地层覆盖, 未见基岩出露, 稳定性较好。沿线不良特殊岩土危害最大的主要为软弱围岩——炭质岩, 其软化系数为 0.25~0.55, 饱和抗压强度为 0.13~1.3 MPa, 长期在地下水溶蚀作用下易产生溶孔或溶沟。

\*\*\*\*\*

- [3] 仇文革, 凌昊, 龚伦, 等. 引水隧洞下穿既有铁路隧道爆破施工振动影响及对策[J]. 中国铁道科学, 2009(6).
- [4] 朱正国, 孙明路, 朱永全, 等. 超小净距隧道爆破振动现场监测及动力响应分析研究[J]. 岩土力学, 2012(12).
- [5] 周建春, 魏琴, 王家辉, 等. 采石场爆破对邻近公路隧道施工质量的影响监测与模拟分析[J]. 中外公路, 2017(2).
- [6] 许海亮, 张继春, 杨红, 等. 钻孔爆破振动速度计算公式及其简化的探讨[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2007(7).
- [7] 刘达, 卢文波, 陈明, 等. 隧洞钻爆开挖爆破振动主频衰减公式研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018(9).

- [8] 邵珠山, 李萍萍, 王新宇. 小净距隧道爆破振动危害的主动控制研究[J]. 应用力学学报, 2014(2).
- [9] 夏才初, 刘志方, 单光炎, 等. 基于爆破振速衰减与控制值的爆破药量计算方法[J]. 现代隧道技术, 2018(4).
- [10] 胡亚辉. 隧道开挖爆破荷载的加载方法研究及应用[D]. 北京交通大学硕士学位论文, 2011.
- [11] 李秀地, 蒋树屏, 刘元雪, 等. 大断面小净距隧道原位扩建爆破振动控制[J]. 爆破, 2014(3).
- [12] 蒋楠, 周传波, 罗钢, 等. 铁路隧道混凝土衬砌爆破振动安全判据[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2012(7).

收稿日期: 2020-04-03(修改稿)

作者简介: 刘卓华, 男, 硕士. E-mail: 778036266@qq.com

隧道开挖施工期间,掌子面的炭质岩受构造影响显著,岩体扭曲、揉皱现象明显,岩体中可见光滑结构面,局部为碎屑状碎裂构造,炭质岩中常夹有粉状或碎块状石英岩脉,具有开挖后风化快、易崩解等特点,开挖断面的炭质岩隧道围岩因其自身稳定性差和在水的作用下会分层脱落或垮塌,发生蠕变。

## 2 研究目的

鉴于上述问题,在隧道左线炭质岩段(Z2K4+055~Z2K4+090)埋设监控传感器,根据现场工程地质调研和监控量测,研究隧道开挖应力释放状态下炭质岩围岩变形机理及蠕变发展规律。监测项目及目的如表 1 所示。

表 1 监测项目与监测目的

监测项目	仪器名称	监测目的
围岩变形	多点位移计	研究围岩蠕变机理及规律
土压力	土压力盒	分析围岩应力场
温湿度	温湿度传感器	获得隧道围岩温度场
岩体波速	自动循测仪	分析炭质岩围岩完整性
裂隙水压力	渗压计	获得隧道围岩渗流场
锚杆应力	锚杆应力计	优化隧道支护方案

据此,通过现场监测数据研究隧道围岩随时间变化的岩体蠕变,随后构建科学计算方法,对炭质围岩蠕变进行预测分析,为隧道施工及运营养护提供参考。

### 2.1 监测断面布置

根据施工超前预报以及现场开挖情况确定隧道的炭质岩段,设计现场炭质岩围岩试验段桩号为 Z2K4+055~Z2K4+075,炭质岩隧道现场试验每隔 5 m 布置 1 个监测断面,共 5 个断面。埋设相应传感器的钻孔深 6 m。多点位移计的测点用钢套筒与围岩浇筑(图 1)。

### 2.2 现场试验实施

采用风枪对目标桩号隧道围岩钻孔,结果表明,钻孔较不规则,并且随着钻孔深度、钻杆长细比增加,导致钻孔弯曲无法埋设传感器。为此采用潜孔钻机对隧道围岩重新钻孔,效果较好。

完成钻孔工序后,开始埋设传感器。同时,传感器线需设保护管,以防止数据线损坏。

### 2.3 监测频率及监测周期

隧道施工期,每天监测 1 次,待隧道完工后每周监

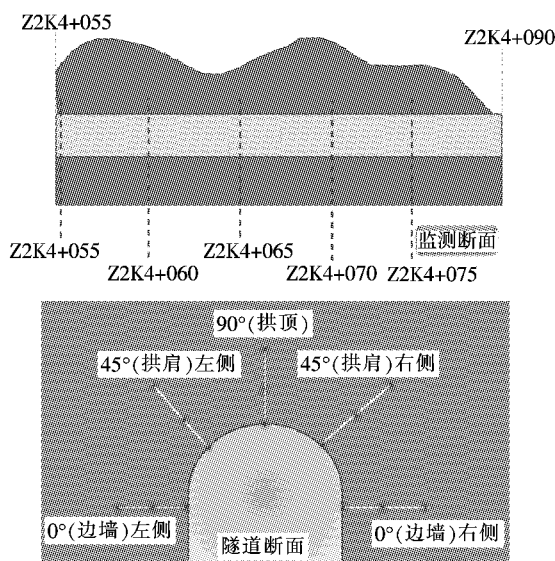


图 1 位移计布置断面图

测 1 次。

## 3 基于 Singh—Mitchell 模型的围岩蠕变计算分析

### 3.1 炭质岩隧道围岩位移监测结果分析

在炭质岩隧道围岩 1~5 号断面中的 0°左右两侧、45°左右两侧埋设位移计,深度为 6 m。采用风枪在隧道 90°拱顶位置钻孔后,由于钻孔越深钻杆长细比越大,杆件失稳引起钻孔洞内弯曲,不便于埋设位移计,同时监测效果较差。若采用潜孔钻机在隧道 90°拱顶位置钻孔则需要搭设台架,而该措施将影响隧道施工,因此未对隧道拱顶位移进行监控量测。现采集约 100 d 位移监测数据,结果如图 2 所示。

由图 2 可知:① 围岩处于受拉状态,位移均小于 0,为负数;② 各断面位移与时间的变化关系曲线(以下简称“位移时程曲线”)形态基本一致,均体现为幂函数型曲线;③ 位移时程曲线最终趋于稳定,大致过程为:初期急剧变化,近 40 d 后曲线变化逐渐减缓,随时间增大,曲线增长速率(斜率)减小;④ 围岩最大位移(第 5 号断面 0°右侧位置)达到 -35 mm,最小位移(第 4 号断面 45°右侧位置)接近 0 mm。

经机理分析认为,影响围岩变形的因素有以下几点:① 隧道开挖引起应力释放;② 温度引起岩体蠕变;③ 裂隙渗透水压力;④ 地下水及降雨以及施工因素等。因此需要考虑综合因素分析围岩变形规律。

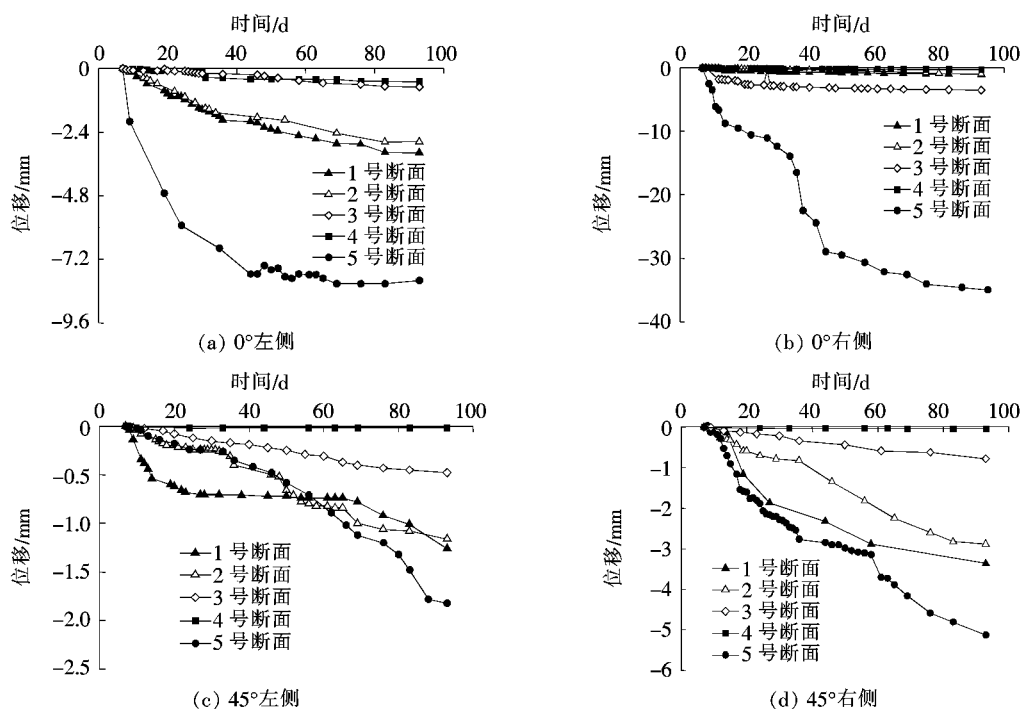


图 2 围岩位移监测结果

### 3.2 基于 Singh—Mitchell 模型的围岩蠕变计算及预测

为研究炭质岩隧道围岩变形规律,预测围岩蠕变,为隧道运营维护阶段提供预警信息,选取温度释放较小、渗压低的位置进行围岩蠕变分析,仅考虑应力释放因素,分析应力水平对隧道围岩变形、时间关系曲线的影响。

目前流变模型可以分为 4 大类:① 元件模型;② 屈服面模型;③ 内时模型;④ 经验模型。模型①需要引入较多的元件进行组合以模拟岩土体的蠕变特性,模型②、③则要深厚的理论基础,而模型④简易实用,便于工程人员使用。蠕变计算模型采用经典的指数型 Singh—Mitchell 蠕变模型,优点是模型参数较少且便于确定,缺点是考虑的影响因素较为单一,可能存在一定误差,但该模型是一种较为便捷实用的计算方法。

Singh—Mitchell 蠕变公式:

$$d\epsilon = A \cdot e^{\bar{\alpha}} \cdot \bar{D} \left[ \frac{(t)_i}{t} \right]^m dt \quad (1)$$

式中: $\epsilon$  为蠕变值; $d\epsilon$  为蠕变增量,即蠕变对时间的导数; $A$ 、 $\bar{\alpha}$ 、 $m$  为蠕变模型计算参数; $(t)_i$  为单位时间,一般取 1; $\bar{D} = (\sigma_1 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)_f$  为剪应力水平; $\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)_f = S_u$  为不排水剪切强度,可通过参考相

关文献获得。

对式(1)进行积分得到:

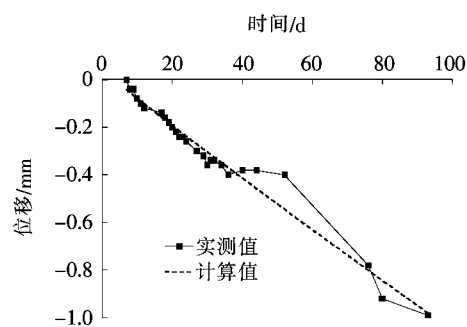
$$\epsilon = \epsilon_0 + A \cdot e^{\bar{\alpha}} \cdot \bar{D} \left[ \frac{(t)_i}{t} \right]^m \quad (2)$$

式中: $\epsilon_0$  为初始蠕变值。

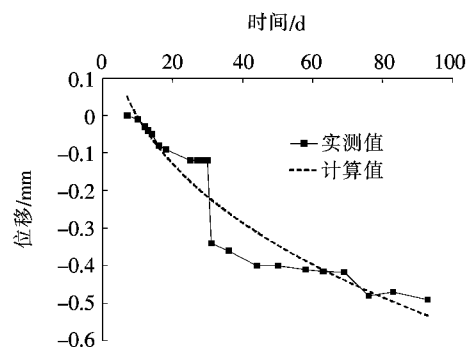
选取炭质岩隧道围岩初始温度及渗压力较小的位置,随后采用 Singh—Mitchell 模型对围岩位移进行计算分析,结果如图 3 所示,模型参数如表 2 所示。

由表 2 可以得出:采用该模型计算其结果的相关系数较高,对于仅考虑应力水平下岩体蠕变时可以采用 Singh—Mitchell 模型计算。同时,通过已获得的模型参数可计算任意时间的围岩位移。采用蠕变模型预测 400 d 隧道通车运营之前(隧道运营期荷载不同)围岩位移如图 4 所示。

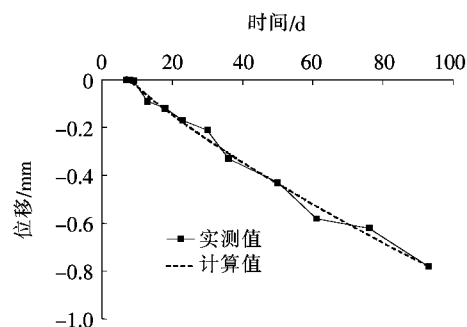
采用模型公式结合模型参数可以预测 400 d 后围岩位移,数值分别为:3 号断面 0°右侧达到 -1.158 21 mm,4 号断面 0°右侧达到 -2.640 04 mm,3 号断面 45°右侧达到 -4.078 29 mm,数值均较小,可判断预测的 3 个位置较为安全。但该预测计算选取的位置温度及渗流较小,仅考虑应力水平,同时位移预测仅在自重荷载条件下,待隧道运营通车后则需要基于交通荷载下分析围岩变形。



(a) 3号断面 0°右侧



(b) 4号断面 0°右侧



(c) 3号断面 45°右侧

图3 基于 Singh—Mitchell 模型的围岩位移计算结果

表2 Singh—Mitchell 模型参数

图形	$\varepsilon_0$	$A \cdot e^{\frac{\sigma}{D}}$	$m$	$R^2$
图 3(a)	0.043 89	-0.014	1.05	0.967 96
图 3(b)	0.486 84	-0.230	3.05	0.890 15
图 3(c)	0.140 68	-0.030	1.32	0.989 84

## 4 结论

(1) 炭质岩隧道在开挖时围岩产生整体受拉变形,局部发生不规则变形。受施工、地下水等因素的影响,围岩出现崩解、泥化现象,造成围岩稳定性降低,承载力减小。

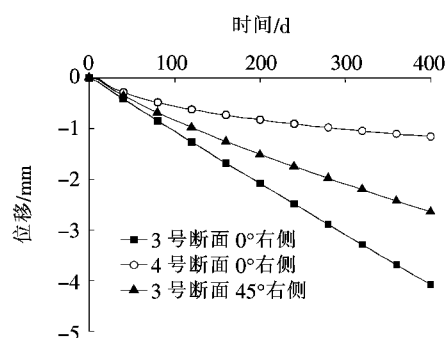


图4 预测 400 d 围岩位移计算值

(2) 由炭质岩隧道围岩位移监测结果得出,炭质岩是一种黏弹塑性材料,位移时程曲线上震荡,回弹变形后位移不能完全恢复。位移时程曲线最终趋于稳定,大致过程为:初期急剧变化,近 40 d 后曲线变化逐渐减缓,曲线随时间增大,增长速率(斜率)减小。

(3) 采用 Singh—Mitchell 模型计算分析炭质岩隧道围岩位移数据,相关系数较高。基于获得的模型参数与 Singh—Mitchell 公式可预测炭质岩隧道围岩 400 d 内通车前蠕变发展规律,对于指导隧道施工和采取防治加固措施具有重要的参考意义。

## 参考文献:

- [1] 邓胜强,谢东,唐正辉.炭质岩边坡破坏模式及处治措施研究[J].西部交通科技,2014(6).
- [2] 黄明琦.高地应力炭质泥岩隧道变形控制技术[J].铁道建筑技术,2015(7).
- [3] 刘雪冬.炭质泥岩地层大变形偏压隧道施工技术[J].隧道建设,2015(S2).
- [4] 王成,丁敏,李强.鄂西地区炭质页岩隧道围岩变形规律研究[J].地下空间与工程学报,2007(S2).
- [5] 刘怀荣.炭质页岩大变形隧道支护参数优选分析[D].兰州交通大学硕士学位论文,2016.
- [6] 杨天鸿,芮勇勤,朱万成,等.炭质泥岩泥化夹层的流变特性及长期强度[J].实验力学,2008(5).
- [7] 张彦龙,田卿燕,林海山.姚双坳隧道运营期地质综合探测技术研究[J].中外公路,2017(6).
- [8] 刘钦,李术才,李利平,等.软弱破碎围岩隧道炭质页岩蠕变特性试验研究[J].岩土力学,2012(s2).
- [9] 袁静,龚晓南,益德清.岩土流变模型的比较研究[J].岩石力学与工程学报,2001(6).
- [10] SINGH A, MITCHELL J K. General Stress—Strain—Time Function for Soils[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1968, 94(1): 21—46.
- [11] 沙运斌,付晓彤,陈筠.贵阳地基红黏土的 Singh—Mitchell 蠕变模型研究[J].路基工程,2019(4).