

Research on Surrounding Rock Deformation Control Technology for Shallow Tunnel with Extra Large Section

Zimao Wang^{1*}, Hongjing Guo², Xiaojun Li¹

¹The 2nd Engineering Co. Ltd. of China Railway Tunnel Group, Yanjiao Hebei

²Luoyang Luxing Highway Engineering Test Co., Ltd., Luoyang Henan

Email: *1429466249@qq.com

Received: Nov. 29th, 2019; accepted: Dec. 7th, 2019; published: Jan. 6th, 2020

Abstract

The Tencent Seven Star Data Center Tunnel Group in Guizhou's Gui'an New District is a large-section tunnel. The construction and deformation control is the most difficult. It is necessary to optimize the support scheme to control the surrounding rock deformation and ensure the safety of excavation. In this paper, the rationality of shallow tunnel support design is verified by rock mechanics experiment, support design and deformation monitoring. It can be known from the research that through the monitoring data, the convergence displacement of the rock is small, the settlement displacement of the arch is large, and the shallow tunnel should focus on the vertical direction. During the construction process, the dome deformation should be paid attention to. At the same time, through this research, it also provides reference for the same type of engineering construction.

Keywords

Extra Large Section, Shallow Burial, Deformation Control, Displacement Monitoring

特大断面浅埋隧道围岩变形控制技术研究

王子茂^{1*}, 郭红静², 李晓军¹

¹中铁隧道局集团二处有限公司, 河北 燕郊

²洛阳市路星公路工程试验检测有限公司, 河南 洛阳

Email: *1429466249@qq.com

收稿日期: 2019年11月29日; 录用日期: 2019年12月7日; 发布日期: 2020年1月6日

*通讯作者。

摘要

贵州省贵安新区腾讯七星数据中心隧道群属特大断面隧道，施工和变形控制难度最大，需进行支护方案优化，控制围岩变形，确保开挖安全。本文通过岩石力学实验、支护设计、变形监测等手段验证了浅埋隧道支护设计合理性。由研究可知：通过监测数据可知，岩石的两侧收敛位移较小，拱顶沉降位移较大，浅埋隧道应着重满足竖直方向受力要求，施工过程中，应重点关注拱顶变形。同时，通过该研究也为同类型工程施工提供了借鉴。

关键词

特大断面，浅埋，变形控制，位移监测

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来，随着我国经济快速发展，特别是国家“一带一路”倡议的提出，隧道及地下工程建设数量越来越多，规模越来越大[1] [2] [3] [4]。目前，我国关于浅部破碎围岩下巷道施工及支护问题一直未得到良好的解决方案，隧道开挖应力重分布不利于隧道围岩的稳定性，加之在软弱围岩、断层破碎带等复杂围岩赋存环境下，隧道拱顶塌方、围岩侵入净空、支护构件破坏等现象频发，给现场安全施工带来极大挑战[5] [6] [7]。因此选择合适的开挖方法及围岩控制技术对超大断面隧道安全施工至关重要[6] [7] [8] [9]。同时，随着科学技术的快速发展，我国迎来数据中心建设的新一轮高潮，传统的数据中心基础设施建设的安全性和隐蔽性稍显不足。建设一个“高隐蔽、高防护、高安全”的绿色高效灾备数据中心就显得尤为必要。在这个大背景下，因隧道山体及岩层可避免或减轻核武器打击，同时对地震、飓风等自然灾害及爆炸人为灾害具有高防护性，极大提高和保证数据中心的安全性。由此，本文以贵安腾讯七星数据中心为例，对大断面下浅埋隧道群围岩变形控制进行研究。

2. 工程概述

2.1. 工程概况

贵安新区腾讯七星数据中心位于贵安新区金马大道与天府路交叉口西南侧，项目北临天府路、东接金马大道、南靠天玑路，东侧为白马大道，图 1 为隧道周边位置关系图。项目总占地面积约 770 亩，隧道面积约 3 万平方米。一期工程隧道设置在园区内栖凤坡山体内，栖凤坡山体宽约 330 m，长约 450 m，最高海拔 1316 m，相对高差约 80 m。

本项目隧道土建部分为 5 条主体隧道 + 1 条油库隧道 + 1 条人防指挥中心隧道 + 排风井 + 联络横洞 + 联络通道，均为复合式衬砌结构。隧道群平面布置如图 2 所示，其中在 B1 隧道中部与 A1 隧道采用特大断面平行交叉过渡，该处埋深 29.017 m，施工和变形控制难度最大，需进行支护方案优化，控制围岩变形，确保开挖安全。

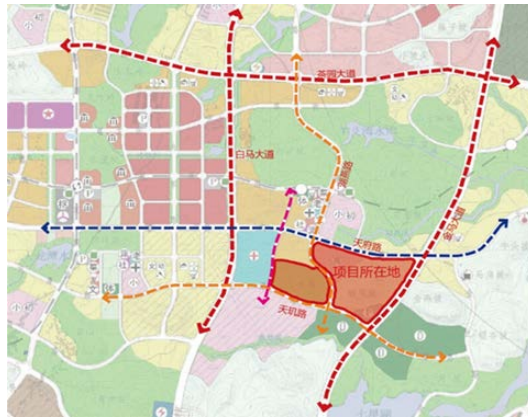


Figure 1. Location map of the tunnel area

图 1. 隧道周边位置关系图

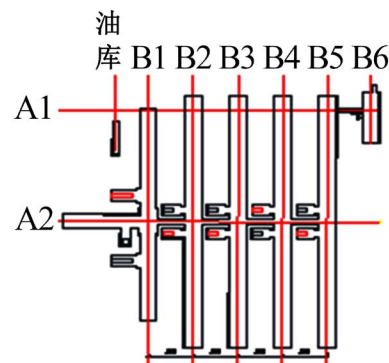


Figure 2. Tunnel group floor plan

图 2. 隧道群平面布置图

2.2. 地质条件

项目区地处扬子准地台黔北台隆遵义断拱贵阳复杂构造变形区与黔南台陷贵定南北向构造变形区的交接部位。区内无断层出现，岩层连续、稳定，受构造影响，岩体节理发育，节理间距 20~350 mm，延伸长度 1.0~8.0 m 不等，切割深度 1.0~5.0 m 不等，节理面较平直，一般为泥质、碎屑充填，结合较差。场区覆盖层为第四系残坡积层红粘土，红粘土具有上硬下软、失水收缩的特性，但其承载力相对较高。下伏基岩为三叠系下统安顺组薄~中厚层状白云岩夹泥质白云岩，且岩石具有风化特征。根据测区地下水赋存条件和含水介质特性、岩性及其组合的特点，区内地下水的类型主要有松散岩类孔隙水和碳酸盐岩类岩溶水。

3. 岩石力学实验与岩体质量分级

3.1. 岩石力学实验

选取场区不同地点基岩进行现场取样，获得现场岩样类别为白云岩及泥质白云岩。将岩石运送至重庆大学煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室进行物理力学性质进行测试实验。

选取 CE9201 岩土工程质量检测仪及 MTS815 试验机(图 3)对岩样分别进行声波测试和单轴抗压实验测试。单轴抗压实验测试所得的不同岩样的应力-应变曲线如图 4 所示，表 1 为岩样的物理力学实验指标结果。



Figure 3. MTS815 rock mechanics test system
图 3. MTS815 岩石力学试验系统

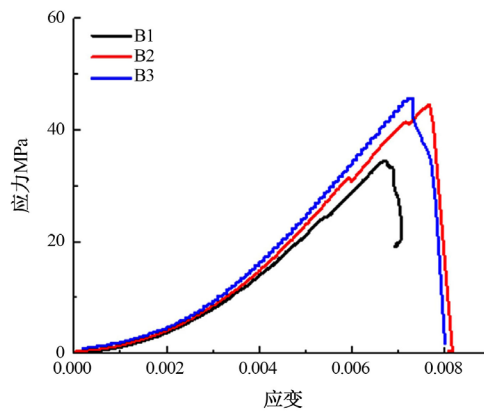


Figure 4. Stress-strain curves of different samples
图 4. 不同岩样的应力应变曲线

Table 1. Statistics table of rock physical and mechanical test indicators
表 1. 岩石物理力学实验指标统计表

岩石类别	参数类型	范围值	平均值
白云岩	重度(kN/m ³)	26.9~24.1	25.7
	岩石弹性纵波波速(m/s)	5400~4280	4655
	完整性系数K _v	0.56~0.59	0.58
	弹性模量(Gpa)	48.2~21.7	33.1
	泊松比	0.29~0.27	0.28
	饱水单轴抗压强度(Mpa)	58.7~27.4	35.3
	C(Mpa)	1.38~21.46	1.42
	φ(°)	42~54	48
泥质白云岩	重度(kN/m ³)	26.2~24.1	25.1
	岩石弹性纵波波速(m/s)	3562~2672	3117
	完整性系数K _v	0.34~0.42	0.38
	弹性模量(Gpa)	15.6~5.2	10.4
	泊松比	0.32~0.28	0.3
	饱水单轴抗压强度(Mpa)	25.5~11.7	18.9
	C(Mpa)	0.72~1.0	0.86
	φ(°)	38.9~50.3	44.6

3.2. 岩体质量分级

由于组成岩体的岩石性质、组织结构不同，以及岩体中结构面发育情况的差异，致使岩体力学性质相当复杂。为了在工程设计与施工中能区分出岩体质量的好坏和表现在稳定性上的差别，需要对岩体做出合理分类。岩体质量分级作为工程选择结构参数和评价经济效益的重要依据，是岩石力学与工程应用方面的基础性工作。

本文利用 BQ 分类法对隧道群周边的白云岩和泥质白云岩进行了岩体质量分级。式(1)为岩体基本质量指标 BQ 值计算方法，表 2 为岩体质量分级结果对照表。

$$BQ = 90 + 3\sigma_{cw} + 250K_v \quad (1)$$

式中， σ_{cw} 为岩石单轴抗压强度， K_v 为岩体完整性系数。

分别将表 1 中白云岩和泥质白云岩的相关物理力学参数带入式(1)，得：

白云岩 BQ 值为： $90 + 3 \times 35.3 + 250 \times 0.58 = 340.9$

泥质白云岩 BQ 值为： $90 + 3 \times 18.9 + 250 \times 0.38 = 241.7$

另外，岩石单轴饱水抗压强度也可以间接反映出岩石的坚硬程度，表 3 为岩石坚硬程度划分表。

根据计算出的 BQ 值并结合表 2、表 3 可知，隧道群周边的白云岩岩体质量分级为 IV，属于较坚硬岩，岩体较破碎或破碎。泥质白云岩岩体质量分级为 V，属于较软岩，岩体破碎。

Table 2. Comparison table of rock mass quality classification

表 2. 岩体质量分级对照表

岩体质量级别	岩体质量的定性特征	BQ 值
I	坚硬岩，岩体完整；	>550
II	坚硬岩，岩体较完整； 较坚硬岩，岩体完整	550~451
III	坚硬岩，岩体较破碎； 较坚硬岩或软、硬岩互层，岩体较完整； 较软岩，岩体完整	450~351
IV	坚硬岩，岩体破碎； 较坚硬岩，岩体较破碎或破碎； 较软岩或较硬岩互层，且已软岩为主，岩体较完整或较破碎； 软岩，岩体完整或较完整	350~251
V	较软岩，岩体破碎； 软岩，岩体较破碎或破碎； 全部及软岩或全部及破碎岩	<250

Table 3. Classification of rock hardness

表 3. 岩石坚硬程度划分表

σ_{cw}/MPa	>60	60~30	30~15	15~5	<5
坚硬程度	坚硬岩	较坚硬岩	较软岩	软岩	极软岩

4. 岩体支护方案研究

地应力在巷道钻凿后会重新分布，巷道周围部分围岩强度小于地应力而形成塑性区，塑性区周围岩体强度大于地应力处于弹性状态。为了方便求解围岩弹塑性解，将模型简化为平面应变条件下的圆形隧道，原理图如图 5、图 6 所示[10]。

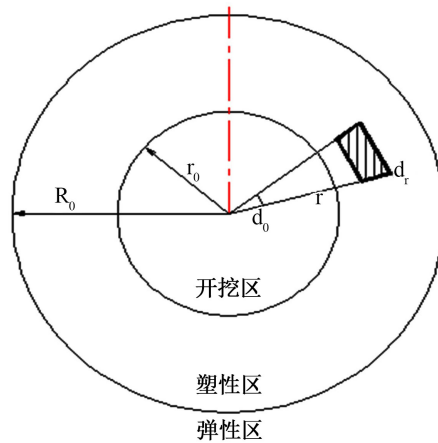


Figure 5. Plastic zone of surrounding rock excavation
图 5. 围岩开挖塑性区

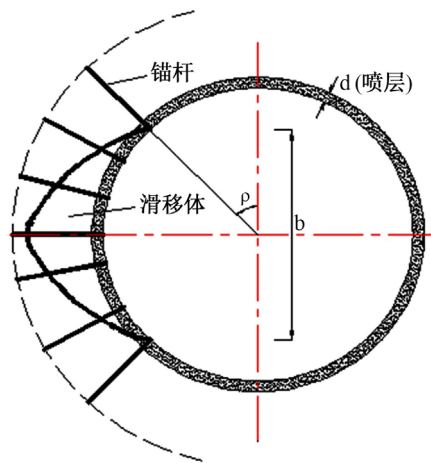


Figure 6. Schematic diagram of anchor spray support resistance calculation
图 6. 锚喷支护抗力计算原理图

综合塑性区平衡方程、M-C 屈服准则及弹塑性区的应力协调条件得出塑性区半径 R_0 与支护抗力 P_i 的公式:

$$R_0 = r_0 \left[\frac{(P_0 + c \cot \varphi)(1 - \sin \varphi)}{P_i + c \cot \varphi} \right]^{\frac{1 - \sin \varphi}{2 \sin \varphi}} \quad (1)$$

$$P_i = (P_0 + c \cot \varphi)(1 - \sin \varphi)(r_0/R_0) \frac{2 \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} - c \cot \varphi \quad (2)$$

式中: P_i 为支护抗力; P_0 为地应力; c 、 φ 分别为岩体粘结力、内摩擦角; r_0 为巷道半径(或等效半径); R_0 为塑性区半径。

把式(1)继续变换, 得出求围岩松动区半径 R_{00} 的公式:

$$R_{00} = r_0 \left[\frac{(P_0 + c \cot \varphi)(1 - \sin \varphi)}{P_i + c \cot \varphi} \right]^{\frac{1 - \sin \varphi}{2 \sin \varphi}} = R_0 \left(\frac{1}{1 + \sin \varphi} \right)^{\frac{1 - \sin \varphi}{2 \sin \varphi}} \quad (3)$$

若令 $R_0 = r_0$ ，则围岩全部处于弹性状态，可得：

$$P_{i\max} = P_0(1 - \sin \varphi) - c \cos \varphi \quad (4)$$

当前计算 $P_{i\max}$ 的方法都不太实用，而围岩的最小支护抗力可通过剪切滑移理论计算。假设巷道松动破坏的条件是滑移体的重量全部由支护抗力来支撑，即可得到计算 $P_{i\min}$ 的新公式：

$$P_{i\max} = \frac{1}{2} \gamma r_0 \left(\frac{R_{00\max}}{r_0} - 1 \right) \quad (5)$$

$$R_{00\max} = r_0 \left[\frac{(P_0 + c \cot \varphi)(1 - \sin \varphi)}{(P_{i\min} + c \cot \varphi)(1 + \sin \varphi)} \right]^{\frac{1 - \sin \varphi}{2 \sin \varphi}} = R_0 \left(\frac{1}{1 + \sin \varphi} \right)^{\frac{1 - \sin \varphi}{2 \sin \varphi}} \quad (6)$$

$R_{00\max}$ 为与 $P_{i\max}$ 相应的松动区半径， γ 为岩体容重。此时松动区几乎无粘结力；当地应力越大， c 和 φ 值越小。

根据各隧道地质情况，二次衬砌承受围岩压力按全部围岩 + 人防荷载压力的 100% 计算，水位线位于隧道底板以下，不考虑水压力，A1、B1 隧道支护参数如下表 4 所示。支护方案为利用 YT-28 气腿式凿岩机在开挖隧道的拱部及边墙垂直岩面环向钻凿系统锚杆孔，安装锚杆，铺设钢筋网，并保证钢筋网沿被支护围岩面的实际起伏形状铺设。待上述工作完成之后，利用 KC30 湿喷机械手喷射混凝土，施喷时，应保证喷头与受喷面基本垂直，且距离保持在 2 m 左右，一次喷射厚度不宜超过 10 cm，后一层与前一层喷射时间间隔 12~20 min，喷射作业应分段分片进行，分段长度不宜大于 6 m。

Table 4. Permanent support design parameter table

表 4. 永久支护设计参数表

隧道项目	喷砼		中空锚杆		
	设置位置	厚度(cm)	设置位置	长度(m)	环×纵间距(m)
A1	全环	33	拱部边墙	4	1.2 × 0.5

5. 监测方案

监测数据能准确反映出当前隧道工程开挖的安全性，一直都是隧道施工过程中的重要依据。在贵安新区腾讯七星数据中心隧道群施工过程中开展了两种隧道监测方案，分别为地表监测和围岩监测，监测设备为徕卡 TS09 全站仪。

5.1. 地表监测

本隧道采用理论计算得出支护及施工参数进行了施工，为验证计算分析的合理性，同时掌握 6 隧道结构的受力状态和对周围环境影响信息，在施工过程中进行了现场试验。现场试验的监测项目以位移监测为主，确保监测结果的可靠性。结合腾讯七星数据中心隧道基础地质信息、衬砌类型和设计既定的隧道监控量测方案，同时为了更加准确的掌握隧道交叉过渡区域围岩整体稳定特征，主要对围岩变形和支护应力以及地表沉降等进行监测。

沿隧道轴线布置 1 地表沉降观测断面，共 13 个测点，测点布置如图 7 所示。隧道开挖前未影响到该处地表沉降时，即要布置该处的观测点，测得测点初始值。与初始值的差值，即为累积沉降值。隧道施工完成后，引起的最终地表沉降如图 8 所示。从图 8 可以看出：最大沉降值位于拱顶上方地表，为 22.1 mm，控制在允许范围(小于 30 mm)内。

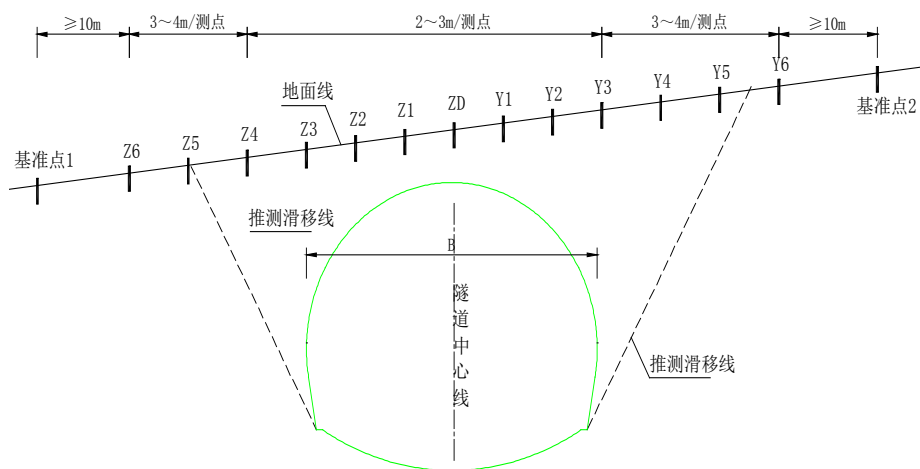


Figure 7. Layout of the hole monitoring measurement points
图 7. 地表监控量测点布置图

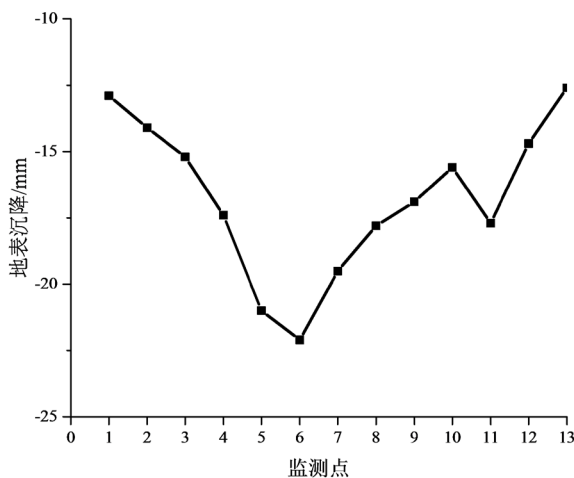


Figure 8. Measured surface settlement curve
图 8. 实测地表沉降曲线图

5.2. 围岩监测

隧道开挖后，围岩的位移是围岩和支护形态变化最直接、最明显的反映，净空的变化(收缩和扩张)是围岩变化最明显的体现。通过周边收敛和拱顶下沉监测，反馈围岩变化信息，及时指导施工。本文巷道围岩监测点布置如图 9 所示。

根据隧道布置的拱顶下沉测点和水平收敛测线的实测结果，隧道围岩和支护结构变形较小，水平收敛一般在 5 m 以内最大值仅为 5.6 mm。拱顶下沉一般小于 15 mm，最大值仅为 17.6 mm，小于控制指标 (35 mm)，围岩和初期支护结构处于安全状态。隧道变形受开挖过程影响明显，从图 10、图 11 可见：拱顶下沉在开挖 70 d 后趋于稳定，稳定值为 15 mm 左右。

6. 结论

1) 岩石抗压强度及纵波波速随岩石风化程度的增加而增加，但岩石的内摩擦角及内聚力随岩石风化程度变化程度不明显。

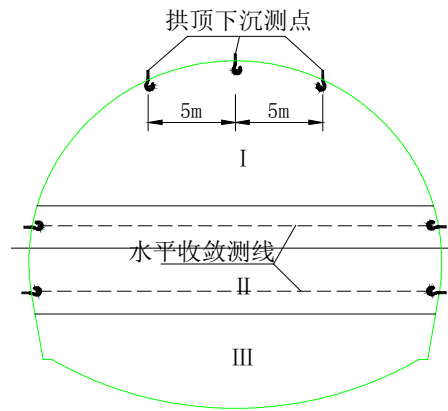


Figure 9. Tunnel monitoring point layout
图 9. 隧道监测点布置图

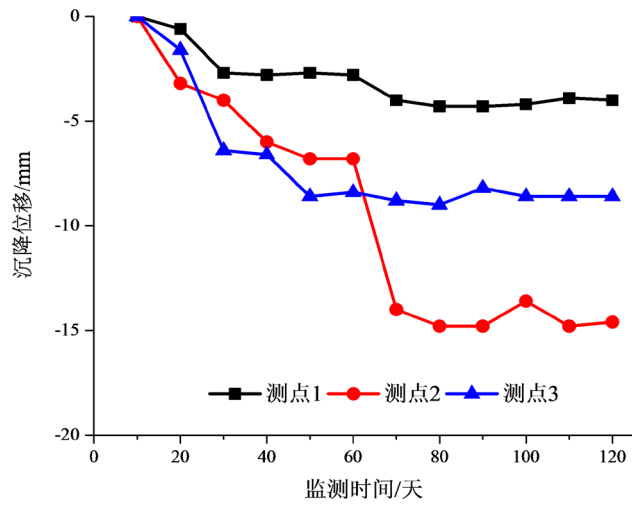


Figure 10. The convergence of the two tunnels with time
图 10. 隧道两帮随时间的收敛规律

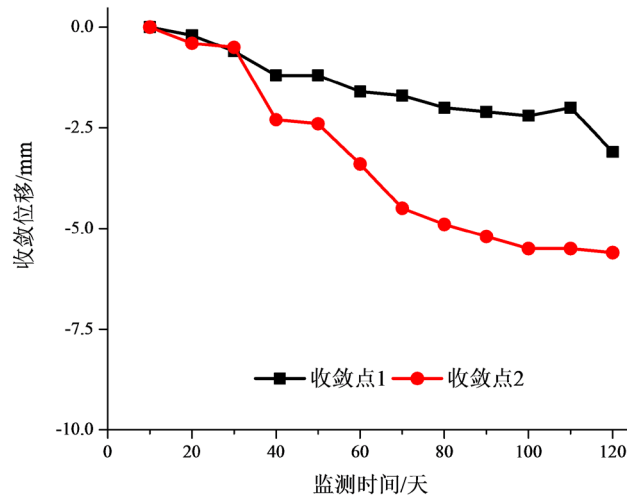


Figure 11. Settlement of tunnel vault with time
图 11. 隧道拱顶随时间的沉降规律

2) 通过监测数据得知, 岩石围岩变形均在控制指标范围内, 满足隧道设计要求。

3) 通过监测数据可知, 岩石的两侧收敛位移较小, 拱顶沉降位移较大, 浅埋隧道应着重满足竖直方向受力要求。

4) 通过现场监测数据可知, 在隧道拱顶位置处围岩的下沉量最大, 施工过程中, 应重点关注拱顶变形。

参考文献

- [1] 母元林. 大跨度软岩隧道快速施工技术[J]. 现代隧道技术, 2011, 48(5): 125-133.
- [2] 张文彦. 城市地铁渡线区变截面群洞隧道施工技术的优化研究[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 合肥工业大学, 2009: 36-43.
- [3] 李兆平, 汪挺, 郑昊, 等. 复杂环境下浅埋大跨地铁渡线隧道施工地层沉降控制方法研究[J]. 中国安全科学学报, 2008, 18(11): 107-112.
- [4] 吴梦军, 黄伦海. 四车道公路隧道动态施工力学研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(1): 3057-3062.
- [5] 袁勇, 王胜辉. 超大断面低扁平率公路隧洞先成预应力结构新型支护体系数值模拟[J]. 岩土力学, 2008, 29(1): 240-244.
- [6] 贾开民. 大跨扁平隧道施工技术[J]. 铁道建筑技术, 2006(2): 32-34.
- [7] 岳顺, 代高飞, 皮文丽. 浅埋大跨连拱隧道的变形监控及数值模拟[J]. 重庆大学学报, 2008, 31(5): 568-572.
- [8] 刘长祥, 吕常新. 三车道大断面高速公路隧道稳定性数值模拟[J]. 地下空间与工程学报, 2007, 3(4): 688-692.
- [9] 任尚强. 大跨度隧道洞口浅埋段工法探讨及应用[J]. 地下空间与工程学报, 2008, 4(5): 993-998.
- [10] 刘保成, 高志军, 谢经臣, 等. 浅埋大断面黄土隧道变形控制技术研究[J]. 现代矿业, 2017(6): 244-247.