

# Monitoring and Analysis on the Detachability of Tunnel Emergency Support Structure in Landslide Affected Area

Jianhua Cai<sup>1</sup>, Heng Zhang<sup>1</sup>, ZeXiang Hu<sup>2</sup>

<sup>1</sup>China Railway Southwest Research Institute Co., LTD., Chengdu Sichuan

<sup>2</sup>School of Environment and Resource, Southwest University of Science and Technology, Mianyang Sichuan  
Email: jianhua0017@sina.com

Received: Feb. 26<sup>th</sup>, 2020; accepted: Mar. 12<sup>th</sup>, 2020; published: Mar. 19<sup>th</sup>, 2020

---

## Abstract

In view of the phenomenon of tunnel passing through the affected area of landslide, this paper takes a tunnel of a certain expressway as an example to discuss the technology, introduces the general situation of tunnel engineering and the basic engineering geological conditions of the landslide area. Based on the analysis, monitoring and control of mechanical properties of tunnel structure, the monitoring measures for temporary emergency inclined support are arranged. The qualitative analysis method of engineering geological factors and warning limit method are used to analyze the monitoring results, study the influencing factors that cause the stress fluctuation of inclined support, analyze and evaluate the influence degree of temperature on the stress of temporary inclined support, reduce or even avoid the surface defects of monitoring data, and put forward reasonable suggestions for the feasibility of temporary inclined support removal. Since the completion of emergency treatment in the construction period, the tunnel has been in safe operation for 5 years. It has been proved that it is necessary to carry out mechanical monitoring on the temporary emergency support structure, and the in-depth analysis of monitoring results and data is scientific, which is worthy of reference for similar projects.

## Keywords

Tunnel, Landslide, Emergency Supporting, Detachability, Monitoring

---

# 滑坡影响区隧道应急支护结构可拆除性监测分析

蔡建华<sup>1</sup>, 张恒<sup>1</sup>, 胡泽祥<sup>2</sup>

<sup>1</sup>中铁西南科学研究院有限公司, 四川 成都

<sup>2</sup>西南科技大学环境与资源学院, 四川 绵阳  
Email: jianhua0017@sina.com

收稿日期: 2020年2月26日; 录用日期: 2020年3月12日; 发布日期: 2020年3月19日

## 摘要

针对隧道穿越滑坡影响区的现象, 以某高速公路某座隧道为例进行技术探讨, 介绍了隧道工程概况及滑坡区域基本工程地质条件。以隧道结构力学性状分析、监测与控制为基本思路, 布置针对临时应急斜支撑的监测措施。综合使用工程地质因素定性分析法与警戒界限法进行监测成果分析, 研究引起斜支撑应力波动的影响因素, 分析评价了温度对临时斜支撑应力的影响程度, 减小甚至规避了监测数据表面缺陷, 并针对临时斜支撑拆除的可行性提出了合理化建议。从施工期应急整治完成至今, 该隧道已安全运营5年, 实践证明, 对临时应急支护结构进行力学监测是必要的, 对监测成果数据深层次分析是科学的, 值得类似工程借鉴。

## 关键词

隧道, 滑坡, 应急支护, 可拆除性, 监测

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

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

## 1. 引言

随着公路、铁路、水利水电等基础设施建设工程的持续发展, 人类对地下空间的研究、开发和使用愈发强烈, 相应的地质问题也愈发突显, 滑坡问题就是其中的首要地质问题。在山区道路工程建设过程中, 路基工程面临的滑坡等地质问题屡见不鲜, 人类对其已经研究积累了丰富的诊治经验。对长大隧道来说, 涉及地质问题更为复杂, 尤其在勘察期间受各种主客观因素的制约, 单纯依靠施工前的勘察报告, 很难对隧道开挖面前方的复杂地质条件可靠把控。而对于隧道洞身段穿越滑坡(及影响区)的地质问题, 因其隐蔽性强、相互位置关系复杂而成为制约隧道安全与滑坡稳定的隐秘陷阱[1] [2]。

隧道穿越滑坡影响区的施工过程中, 一旦认识不清, 措施很难得当, 极易诱发坡体变形, 进而产生失稳破坏, 酿成工程事故甚至重大工程地质灾害。在对地质情况未明晰掌握的情况下, 隧道结构破坏与滑坡失稳风险的发生概率剧增, 变形异常甚至局部破坏几乎不可避免, 为此, 常常不得不进行应急抢险加固。而在应急抢险过程中, 难免会采取一些临时加固措施。应急抢险效果如何, 临时支护措施能否拆除、何时拆除, 终将成为摆在工程建设者面前的一项难题, 必须有理有据, 慎重决策。为了解决这一难题, 在应急抢险中, 应忙而不乱, 尽力创造条件, 对主要应急支护结构实施力学监测。对监测数据去粗取精以提高可靠度, 挖掘处理数据背后的内涵信息, 深入分析隧道结构的受力性状、滑坡的发育特征及其与隧道的相互关系, 通过这样的严“诊”才能使得工程处“治”有的放矢、对症下药, 做到经济技术双重优化[3] [4]。

本文即以某穿越古滑坡体的隧道施工应急抢险工程为例, 重点从监测角度分析了临时应急支护结构的可拆除性, 为工程处治提供了决策依据, 更指出了隧道施工应急抢险过程中应急监测工作的重要性和监测数据深层次分析的必要性。

## 2. 滑坡影响区隧道工程地质概况

研究对象为四川某高速公路隧道。隧道左线长 978 m, 右线长 1029 m。某滑坡位于一近正北向斜坡上, 隧道洞身前半段大约 600 米范围位于滑坡体区域内。滑坡呈“W”形发育, 滑坡所处斜坡整体坡度 21°左右, 上陡下缓, 中下部发育缓坡平台, 滑坡总体长度约 600 m, 宽度 400~900 m, 前宽后窄, 地表大部分被垦为耕地, 其中水田约占一半, 该斜坡为村委驻地, 斜坡上修建有大量民房和一所小学(图 1、图 2)。

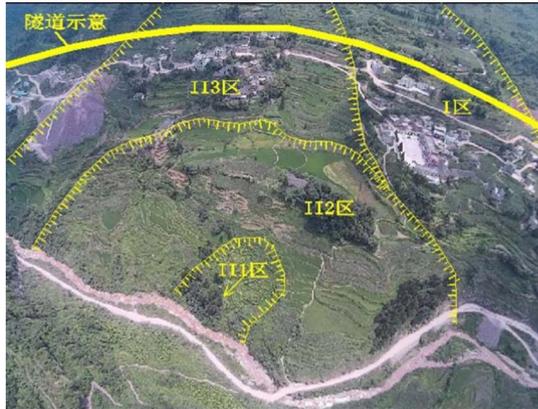


Figure 1. The airspace of the landslide  
图 1. 滑坡鸟瞰图

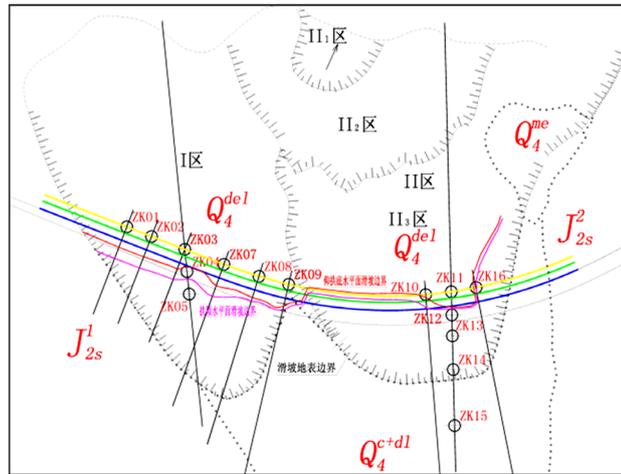
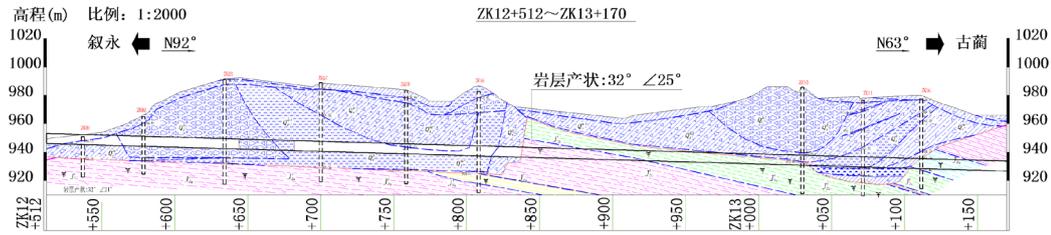


Figure 2. The schematic plan of the relative relationship between the landslide and the tunnel line  
图 2. 滑坡与隧道线路相对关系平面示意图

根据多次勘察成果分析, 该滑坡属覆盖层(土质)滑坡, 为巨型顺层岩质古老滑坡, 具多级滑动、地表分区等特征, 现状基本稳定。根据现场调查及勘探资料, 该滑坡的滑面为顺层的基覆界面, 且该地夏季雨量较大, 在暴雨作用下, 斜坡前缘土体软化, 发生开裂和滑动, 纵横较宽, 滑体平均厚度约 20~30 m, 为大型覆盖层滑坡。该滑坡平面上呈圈椅状, 滑体主要由第四系堆积土体组成, 自重固结作用较好, 结构稍密; 滑体上为农田。该滑坡在隧道施工前期呈稳定状态。

在纵剖面上, 隧道左右线均不同程度的位于滑坡体内, 其中左洞 ZK12+512~ZK12+835 段全断面皆处于 I 区滑坡体内; 右洞 K12+506~K12+720 段左上侧处于 I 区滑坡体内。隧道受滑坡影响区范围大约 658 m (左洞 ZK12+512~ZK12+170) (图 3)。



**Figure 3.** The schematic section of the relative relationship between the landslide and the tunnel body (left line)  
**图 3.** 滑坡与隧道(左线)洞身相对关系剖面示意图

### 3. 滑坡与隧道结构变形破坏现象

#### 1) 滑坡分区特征

滑坡共分为两个大区(I区和II区), I区位于 ZK12+840 之前段(西侧), 该区滑坡主滑方向约 354°, 前后长约 980 m, 宽约 330 m, 占整个滑坡平面面积约 53%, 滑体平均横坡坡度 18.5°, 发育两级平台; II区滑坡位于 ZK12+840~ZK13+160 段(东侧), 该区主滑方向 358°, 滑体前后长 550 m, 平均宽度 405 m, 占整个滑坡平面面积约 47%, 滑体平均横坡坡度 17.8°, 坡体上发育一级平台, 滑体最大厚度达 65.5 m, 平均厚度 30 m, 整个滑坡方量达 1100 多万方, 属巨型深层岩质顺层古老滑坡。

#### 2) 滑坡变形体变形破坏现象

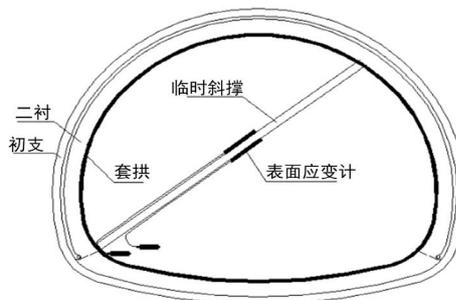
隧道开挖通过滑坡 I 区时, 形成开挖临空面, 引起右侧土体变形、地表开裂以及隧道开裂变形, 地表上主要在 I 区滑体的隧洞右侧形成周界明显的变形体。

#### 3) 隧道变形破坏现象

某年 10 月 13 日, 左洞 ZK12+829~ZK12+817 段二衬及仰拱斜向开裂, 10 月 15 日开始发现右洞 K12+540~K12+720 段右侧拱腰及左侧拱脚有纵向裂缝, 最大裂缝宽度 3 mm。右洞拱顶偏右侧及左侧拱脚位置亦开始出现裂缝, 拱顶裂缝以纵向为主, 拱脚位置纵向和横向、放射状皆有。10 月 18 日, 裂缝有发展延伸趋势, 拱顶纵向裂缝已连通, 左侧拱脚位置出现了更多放射状、纵横向裂缝。10 月 21 日, 拱顶裂缝基本贯通, 其它位置裂缝继续呈发展趋势。

### 4. 应急支护措施及监测布置

隧道右洞二衬开裂段主要采取“套拱 + 临时斜撑 + 横撑”的应急加固措施。为了掌握临时斜撑的受力情况, 了解加固效果和隧道结构稳定性状态, 以及随着后期基底注浆、骑缝锚杆、钢纤维喷射混凝土套衬等加固措施的陆续完成, 斜撑的可拆除性等, 临时布置了针对斜撑应力的监测措施(图 4)。即在临时钢管斜撑跨中处上下表面分别布置 1 个表面应变计, 通过表面应变计与斜撑的同步变形和受力来反应斜撑的应力情况[5] [6] [7]。



**Figure 4.** Drawing of monitoring arrangement for emergency diagonal bracing  
**图 4.** 应急斜撑监测布置示意图

## 5. 应急监测分析

### 5.1. 由果索因基础分析

1) 左洞下导开挖产生轻微的切脚作用引起后方坡体产生局部滑移趋势和势能, 体现在右洞的反应是挤压收敛变形和斜撑压力增加。左洞开挖打破了原有的平衡状态, 若要达到新的平衡势必发生一定规模的变形或应力调整。右洞应力突变最大的斜撑 SS1 (K12+560) 与左洞下导开挖位置连线方向与原滑坡潜在主滑方向(大约为  $10^\circ$ ) 基本平行。综上推测认为, 左洞的下导开挖不一定是影响应力值的主要因素, 但却对应力初始调整起着“先导”作用[8] [9];

2) 隧道顶部上方地表 6 月 3 日开始进行的大规模清方作业也有一定影响, 清方施工对原有平衡状态存在扰动, 使得洞内斜撑受力产生微小的波动。在 6 月 4 日~6 月 5 日的测试中发现, 当拱顶上方在清方时测试数据显示为应力增加, 当停止清方时测试数据显示为应力呈平稳~下降状态。但是在 6 月 5 日晚上 9:50 测试中, 清方作业依然在进行中, 而测得数据显示, 应力有较明显下降。在接下来的观测中, 应力还在不断减小, 因此我们推测, 洞外清方对斜撑应力也有影响, 但作用程度并不强, 或者可以理解为洞外清方对于斜撑受力敏感程度低[10] [11] [12];

3) 前几日降雨也可能是影响因素, 因为右洞 K12+575 左右位置出现点、线状出水现象, 这是在之前数月内没有的。雨水从地表渗入隧道上方, 而隧道排水系统排水需要一定的时间, 积水与含水量增加的同时, 对隧道结构也会产生加载挤压影响, 最后反应为洞内的受力增加, 但这不能解释应力的波动原因。综上分析推测, 降雨加载对斜撑应力增加也会产生影响, 但作用程度不明显。

4) 考虑到物的热胀冷缩性质, 温度的变化也可能是引起应力发生变化的影响因素, 洞内斜撑采用的是 Q235 钢管, 直径 160 mm。因为考虑到只是应力在一个区间内波动, 早上低, 中午高, 晚上低, 而其他变形监测数据却呈现基本平稳状态, 所以开始从材料上考虑应力变化的可能性。斜撑所用钢管材质的线膨胀性对温度反应是较敏感的, 钢管受热要产生膨胀变形, 固定端头阻止其变形就会导致压应力增加[13]。

### 5.2. 单位温差( $1^\circ\text{C}$ )产生的膨胀应力估算

该隧道右洞临时斜撑钢管所用材质为 Q235 普通碳素钢, 即指这种材质的屈服值在 235 MPa 左右。

热膨胀系数 Thermal Expansivity (符号  $\alpha$ ), 一般是指线膨胀系数, 单位是  $1/\text{K}$ , 是随温度变化的一个材料热学性能参数。热膨胀系数在较大的温度区间内通常不是常量。温度变化不是很大时,  $\alpha$  就成了常量。当温度在  $20^\circ\text{C}\sim 100^\circ\text{C}$  时, Q235 钢热膨胀系数在  $(10.6\sim 12.2) \times 10^{-6}/\text{K}$ , 当温度小于  $20^\circ\text{C}$  时, Q235 钢热膨胀系数比前者甚小, 可以相对忽略, 此处就以经验值进行估算, 并取 Q235 钢弹性模量  $E = 206 \text{ GPa}$ 。

假设温差  $\Delta T = 1^\circ\text{C}$ , 按两端约束条件按固定端考虑, 由广义虎克定律知应力变化量:

$$\Delta\sigma = \varepsilon \cdot E \quad (1)$$

轴向线应变:

$$\Delta\sigma = \varepsilon \frac{\Delta l}{l} \quad (2)$$

轴向线伸长量:

$$\Delta l = \alpha \cdot \Delta T \cdot l \quad (3)$$

即应力变化量:

$$\Delta\sigma = \varepsilon \cdot E = \alpha \cdot \Delta T \cdot E \quad (4)$$

代入数据得:

$$\Delta\sigma = (10.3 \sim 12.2) \times 10^{-6} \times 1 \times 206 \times 10^3 = (2.2 \sim 5) \text{ MPa} \quad (5)$$

即温度每上升或下降  $1^\circ\text{C}$ , 应力增加或减小 2.2~2.5 MPa。

## 5.2. 温差效应分析

### 1) 简易计算[7]

以距离洞口最近第一个斜撑下缘的表面应变计 SS1 所得监测数据为例, 按式(5)计算所得结果如表 1 所示。

**Table 1.** Computation sheet between temperature and stress for emergency diagonal bracing  
**表 1.** 应急斜撑温度与应力关系计算表

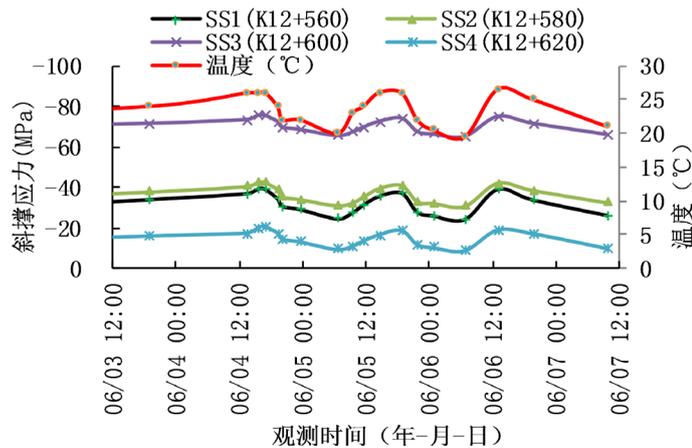
时刻值	温度 T/°C	温差 $\Delta T$ /°C	温差引起应力变化 量估算值/MPa	应力变化量实测值 $\Delta\sigma$ /MPa	温差贡献率/%
2016-05-28 09:12	18				
2016-06-03 19:02	24	+6	+(13.2~15.0)	+21.9	+(60.3~68.5)
2016-06-05 18:50	26				
2016-06-05 21:50	22	-4	-(8.8~10.0)	-9.4	-(94.0~96.0)
2016-06-05 21:50	22				
2016-06-05 21:50	22				
2016-06-06 00:50	20.5	-1.5	-(2.2~2.5)	-1.8	-(120.0~139.0)

注: 表格中“+”代表增加,“-”代表减小。

综上分析大致可以粗略了解, 5月28日09:12~6月3日19:02时间段内, 温差对斜撑应力突变的作用较小, 而其它阶段斜撑应力变化几乎都是由温度变化引起。

### 2) 温度与斜撑应力关系的时程趋同性分析

在同一个图表内分别绘制 SS1 (K12+560)、SS2 (K12+580)、SS3 (K12+600)、SS4 (K12+620)等四个断面的温度时程曲线和斜撑应力时程曲线, 如图 5 所示。



**Figure 5.** Time history curve of stress and temperature for each section of the diagonal bracing  
**图 5.** 各断面斜撑应力与温度时程曲线

为了更明晰的了解温度与斜撑应力的趋同性, 在常规监测频次的基础上进行了加密观测。继续以第一个斜撑下缘的表面应变计 SS1 为例, 截取局部时段(2016年6月3日至2016年6月7日)加密监测数据进行分析, 绘制了局部时段的斜支撑应力时程曲线(图 6)。

由图 6 分析可知, 斜撑应力时程曲线和温度时程曲线趋同性颇高, 尤其自 6月4日13:25开始, 趋同性最高, 这一点也从一定程度上反应了自此时间段后的斜撑应力波动变化主要受温度控制。

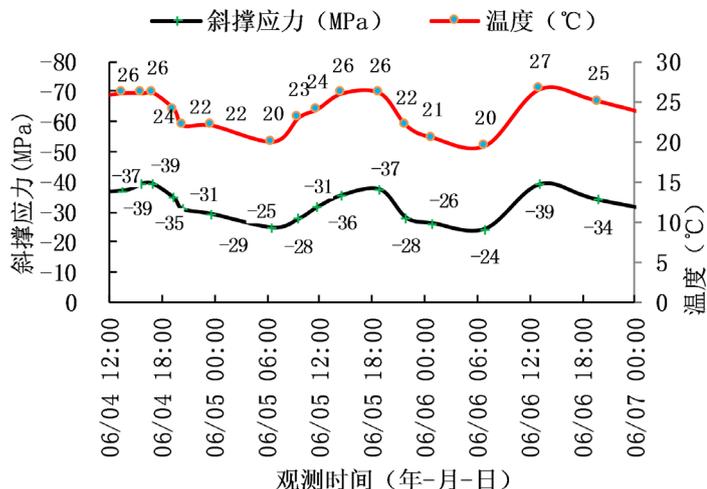


Figure 6. Time history curve of stress and temperature for the diagonal bracing in the local time  
图 6. 局部时段的斜撑应力与温度时程曲线

### 5.3. 临时斜撑的拆除可行性分析

该隧道斜撑为应急抢险阶段的临时加固措施，终归是要拆除的，但何时可以拆除，一方面要了解其它加固整治措施的效果发挥情况，另一方面要掌握临时斜撑初始、历史及当前的受力情况。在前文关于温度影响研究的基础上，对温度影响进行过滤后，得出如表 2 所示的拆除分析建议表。

Table 2. Analysis and calculation table for emergency diagonal bracing  
表 2. 应急斜撑拆除分析计算表

仪器编号 桩号	初始安装稳定后 (2015-11-02 9:08)		温度过滤后应力历史峰值			温度过滤后应力现值 (2016-07-06 19:31)		拆除评估建议
	应力 (MPa)	温度 (°C)	发生时间	温度 (°C)	应力代表值 (MPa)	温度 (°C)	应力代表值 (MPa)	
SS1 K12+560	0.047	13	2016-01-04 16:31	9	-37.6	24	-19	低于历史峰值， 需进一步监测论证
SS2 K12+580	-0.813	13	2016-06-20 12:40	23	-34.2	24	-27	低于历史峰值， 需进一步监测论证
SS3 K12+600	1.067	13	2016-01-24 12:56	2	-77.2	23	-46	低于历史峰值， 需进一步监测
SS4 K12+620	0.777	13	2016-12-04 16:25	9	-18.2	24	0	基本无受力， 可拆除
备注	受力正值表示受拉，负值表示受压。							

## 6. 结语

综上所述，斜撑应力的变化，是在变形体及斜撑等支护结构自身客观条件的基础上，因多种外界因素影响而产生的，外界因素的工况组合关系及其造成的影响非常复杂，无法一一量化，但透过一些数据的分析处理，可以获悉其总体规律。总体规律为：1) 左洞下导开挖是产生应力较大幅度调整的“先导”；2) 温度变化是导致斜撑应力较大规模波动的“直接因素”；3) 上部清方施工与降雨是斜撑应力不规则波动变化的“影响因素”。

关于当前情况是否可以进行斜撑拆除,建议可首先拆除 SS4,其它位置的临时斜撑,尚需继续保持监测,根据监测指标变化情况做进一步评估。

综上亦能说明,在隧道应急抢险工程施工过程中,针对关键部位、关键工序、关键支护构件布置应急监测措施是非常有意义的,同时针对监测数据进行深层次的挖掘分析也是极其必要的。基于此,能使工程处治有理有据,安全风险受控。

## 参考文献

- [1] 张治国,马兵兵,黄茂松,徐晓洋. 山区滑坡诱发既有隧道受力变形影响分析[J]. 岩土力学, 2018, 39(10): 3555-3564+3572.
- [2] 王永刚,丁文其,唐学军. 阳坡里隧道纵穿滑坡体段变形破坏机制与加固效应研究[J]. 岩土力学, 2012, 32(7): 227-233.
- [3] 尹静,邓荣贵,钟志彬,李凯甜,孙春平. 横穿滑坡变形区隧道受力变形规律及影响因素分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(S2): 3615-3625.
- [4] 宗书合,褚玉勇. 马湾隧道浅埋偏压段初期支护变形原因分析及参数优化[J]. 隧道建设(中英文), 2017, 37(S2): 211-217.
- [5] 罗彦斌,陈建勋,杨东辉,等. 隧道锁脚锚管受力测试方法试验研究[J]. 隧道建设, 2016, 36(12): 1435-1441.
- [6] 王忠保,岳澄,孙建军,等. 地铁隧道工程的应力监测[J]. 实验力学, 2003, 18(1): 104-107.
- [7] 张哲. 基坑混凝土支撑轴力监测数据异常情况分析与探讨[J]. 隧道建设, 2016, 36(8): 976-981.
- [8] 黄俊,张顶立. 软土隧道拱顶与地表沉降关系研究[J]. 北京交通大学学报, 2005, 29(1): 36-40.
- [9] 蔡建华,汪家林,张国备. 基于内观变形监测的拉裂体滑裂面评判与特征分析[J]. 工程地质学报, 2011, 19(Suppl.): 412-416.
- [10] 张剑涛,姚爱军,郭海峰,等. 邻近基坑卸荷——加载对既有软土盾构隧道影响分析[J]. 隧道建设, 2016, 36(11): 1348-1355.
- [11] 王志杰,徐君祥,徐海岩,周平,夏勇,李瑞尧,唐力. 第四系富水红砂岩地层隧道围岩变形特征研究[J]. 铁道工程学报, 2018, 35(9): 54-60+109.
- [12] 屈家旺,刘泉声,马昊. 泥质软岩隧道穿越富水断层带初期支护变形侵限机理及处治对策[J]. 现代隧道技术, 2017, 54(3): 181-189.
- [13] 甘安武,龙四春. 隧道围岩变形监测反演分析及稳定性研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2018, 38(12): 1291-1294+1305.