

裂隙破碎围岩大断面隧道现场监测方法与结果分析

陈全胜¹, 李小昌²

¹中电建路桥集团有限公司, 北京

²同济大学土木工程学院地下建筑与工程系, 上海

收稿日期: 2021年9月21日; 录用日期: 2021年10月6日; 发布日期: 2021年10月21日

摘要

隧道变形监测分析作为隧道施工建设过程中的一项重要工作, 对判断围岩特性及后续施工进度具有重要指导意义。本文以云南建(个)元高速公路项目阿白寺隧道为例, 详细介绍了裂隙破碎围岩大断面隧道沉降与收敛监测的控制标准、稳定性判别以及测点布置方法, 对不同类别的围岩, 根据其预留变形量数据, 给出了相应的变形管理等级。结合实际监测数据, 分析了围岩的变形监测结果和规律特征, 结果表明, 裂隙破碎围岩变形具有明显的离散性和差异性时空演化特征, 先行洞的变形数据容易受到后行洞的施工扰动影响, 分析结果为类似隧道的开挖和监测提供了一定的借鉴和指导。

关键词

破碎围岩, 大断面隧道, 现场监测, 沉降, 收敛

Field Monitoring Method and Result Analysis of Large Section Tunnel in Fractured Surrounding Rock

Quansheng Chen¹, Xiaochang Li²

¹PowerChina Roadbridge Group Co., Ltd., Beijing

²Department of Geotechnical Engineering, School of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai

Received: Sep. 21st, 2021; accepted: Oct. 6th, 2021; published: Oct. 21st, 2021

Abstract

Tunnel deformation monitoring and analysis is an important work in the process of tunnel con-

struction, which is of great guiding significance to judge the characteristics of surrounding rock and the subsequent construction process. Taking Abaisi tunnel of Jiangeyuan highway project as an example, this paper introduces in detail the control standard of settlement and convergence monitoring, stability judgement and measuring point arrangement method of large cross-section tunnel excavated in fractured surrounding rock, and gives corresponding deformation management grades for different types of surrounding rock according to their reserved deformation data. Combined with the actual monitoring data, the deformation monitoring results and characteristics of surrounding rock are also analyzed. The results show that the surrounding rock deformation has obvious spatio-temporal evolution features of discreteness and difference, and the deformation data of the antecedent tunnel can be affected by the construction disturbance of the subsequent tunnel. The obtained findings provide certain reference and guidance for the excavation and monitoring of similar tunnels.

Keywords

Fractured Surrounding Rock, Large Section Tunnel, Site Monitoring, Settlement, Convergence

Copyright © 2021 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

隧道工程的建设过程十分繁杂, 需要勘查、设计、施工、监测等多部门相互协调, 共同维护工程建设的安全与稳定。在实际施工过程中, 现场变形监测作为一项重要的隧道围岩稳定性实时监控手段, 为判断隧道的稳定性特征提供了重要的数据支撑, 同时合理的分析监测数据也可以为后续类似工程的设计和施工提供参考[1]。夏才初等针对大断面小净距隧道的特点, 结合地表下沉、洞周收敛和拱顶下沉等现场监测数据, 分析了小净距隧道围岩和支护系统的变形特征[2]; 周丁恒等以广州龙头山隧道为背景, 对洞口边坡及不同围岩情况下的隧道变形规律进行分析, 提出了控制隧道大变形的工程措施[3]。陈秋南等对东莞某高速公路浅埋软弱围岩扁担超大断面小净距隧道变形进行了现场监测, 结果表明隧道位移在 20~25 d 之后基本趋于稳定[4]。祝云华以渝宜高速公路骡坪隧道为工程背景, 通过围岩变形监测分析了隧道大变形段典型围岩的变形特点, 得到了隧道在软弱岩体施工开挖过程中的围岩变形规律[5]。刘国栋对福建省莆炎高速岩头山隧道进行了拱顶沉降和衬砌收敛等监测项目的监测分析, 比较分析了隧道在浅埋地段采用不同开挖方式时围岩及衬砌的变形特点[6]。黄建国等依托厦门海沧疏港通道蔡尖尾山 2#隧道, 对隧道开挖过程中的不同加宽段围岩变形进行了现场监测和对比分析, 指出隧道围岩变形总量随跨度的增大而增大[7]。牛帅斌结合某大断面软岩隧道变形监测数据, 分析了围岩变形特征与隧道结构稳定性特征[8]。杨凯等对丽香线宗思隧道的拱顶沉降、净空收敛等进行监控量测, 分析了软弱炭质页岩隧道大变形的特征[9]。赵香玲依托武都西隧道, 选取监测断面布置测点, 研究了拱顶沉降和周边收敛的变形规律[10]。王永刚等依托兰渝铁路木寨岭隧道工程, 对建设过程中大量监控量测数据进行统计分析, 获得了木寨岭隧道最大水平收敛变形、沉降变形以及挤压大变形的分布规律[11]。刘志春等根据实测变形统计值、理论计算的极限位移及弹性位移, 推算量测丢失位移, 并得出实测变形、二次衬砌前变形速率与极限位移等之间的相互关系, 最后提出不同大变形级别的隧道二次衬砌作时机的判别指标[12]。张国华等结合大帽山隧道工程实践, 通过围岩内部位移、拱顶沉降等现场监控量测工作, 研究了复杂地质条件下大断面小净距隧道双侧壁导坑法施工的围岩稳定性[13]。吴勇和金美海等分别研究了类土型破碎围岩隧道预留

变形量的影响因素及建议方法[14] [15]。

综合分析上述文献, 目前针对裂隙破碎围岩大断面隧道沉降与收敛监测的控制标准或稳定性判别准则的研究较少, 也没有给出可参考的标准值。尤其是对于云南类岩堆体的裂隙破碎围岩, 其预留变形量如何确定更无文献可参考, 给相应的类岩堆体隧道开挖变形管理提出了极大挑战。总之, 由于裂隙破碎围岩结构复杂多变, 具有明显的区域性特征, 导致不同地区的隧道施工建设可能具有不同的围岩特性和变形特征。本文以云南建(个)元高速公路阿白寺隧道工程实例, 系统给出了隧道施工期变形监测的控制标准、稳定性判别以及测点布置方法, 对不同类别的破碎围岩, 根据其预留变形量数据, 提出了相应的变形管理等级。并结合实际监测数据, 分析了围岩的变形监测数据和变形规律特征, 可为类似隧道的监测和施工提供了一定的借鉴和指导。

2. 工程概况

阿白寺隧道设计桩号为左线起点桩号 Z3K18+795, 洞底设计标高 1585.620 m, 终点桩号 Z3K22+320, 洞底设计标高 1693.827 m, 全长 3525 m; 右线起点桩号 K18+805, 洞底设计标高 1585.707 m, 终点桩号 K22+320, 洞底设计标高 1621.367 m, 全长 3515 m。隧道纵坡 1.05% (单向坡), 进口轴线方向 168°, 出口轴线方向 147°, 最大埋深约 390 m, 属深埋特长隧道。隧道进口段以灰岩为主, 出口段以红粘土、泥岩为主, 洞身段以白云岩、灰岩为主, 局部为泥岩, 围岩级别划分结果为 III、IV、V 级。其中 III 级围岩约占隧道长度 85.68%/86.23% (左/右), IV 级围岩约占隧道长度的 4.82%/5.09%; V 级围岩约占隧道长度的 9.5%/8.68%。隧道采用进出口同时对向施工的方法, III 级围岩采用全断面法开挖, IV、V 级围岩采用台阶法开挖。

3. 隧道监测内容

3.1. 监测项目

根据《公路隧道施工监测技术规范》及设计文件要求, 隧道监控量测必测项目包括: 地质及支护状态观察, 洞口地表下沉, 周边收敛, 拱顶下沉。本文主要选取洞身段作为研究目标, 因此主要针对地质及支护状态观察、拱顶沉降和周边收敛监测数据进行分析。

3.2. 隧道稳定性综合评价标准

根据监测数据的变化规律可以判断隧道围岩的稳定性情况, 以便更好的指导当前施工状态。通常可根据位移数据的变化速率和位移时态曲线的形态来进行判别。

① 根据位移速率判别:

当周边位移增加速率小于 0.1~0.2 mm/d 时或拱顶下沉速率小于 0.1 mm/d 时, 认为围岩位移基本达到稳定状态;

当周边位移增加速率或拱顶下沉速率大于 1.0 mm/d 时, 表明位移不稳定, 应加强观测;

当周边位移增加速率或拱顶下沉速率大于 5.0 mm/d 时, 应提出预警, 并进行加固施工。

② 根据位移时态曲线的形态判别:

当位移速率不断下降时($d^2u/dt^2 < 0$)表示围岩趋于稳定状态;

当位移速率保持不变时($d^2u/dt^2 = 0$)表示围岩不稳定, 应考虑加强措施;

当位移速率不断上升时($d^2u/dt^2 > 0$)表示进入危险状态, 应立即停止施工, 进行加固。

3.3. 监测变形管理等级

监测控制标准和预警标准值一般根据设计图纸上预留变形量数据来确定, 根据设计要求, 各类围岩

的预留变形量分别如下: IIIa、IIIb、IIIc 级围岩为 40 mm; IVa、IVb 级为 60 mm; IVc 级为 80 mm; Va 级为 100 mm; Vb 级为 120 mm; Vc 级为 140 mm; 当监测数据达到或者超过预留变形量的 2/3 以上时, 应提出预警并采取特殊加固措施对隧道结构进行加固。

3.4. 测点布置

根据公路隧道施工规范的基本要求, 结合阿白寺隧道的实际结构特点、施工工艺以及地质情况, 不同等级围岩的隧道沉降和周边收敛变形监测断面一般间距如表 1 所示。变形监测断面测点布置如图 1 所示, 图中观察方向为从隧道出口看向进口方向。

Table 1. The space between monitoring section of perimeter convergence and vault subsidence

表 1. 周边收敛、拱顶下沉监测断面间距

围岩等级	断面间距(m)	备注
V~VI	5~10	
IV	10~20	视围岩具体情况确定间距
III	30~50	

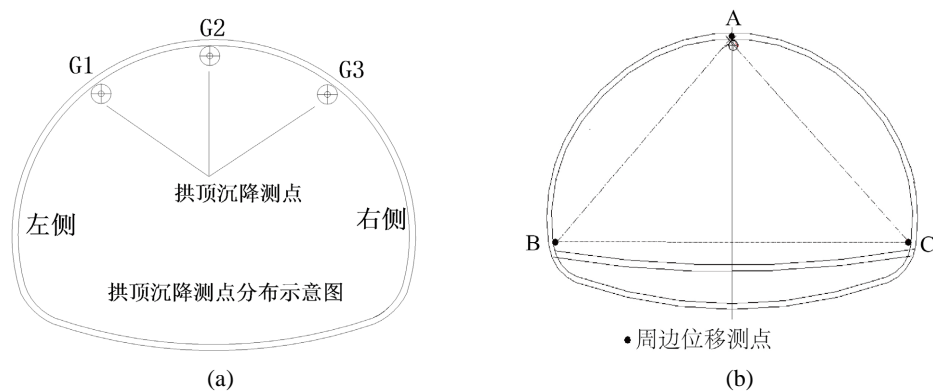


Figure 1. Layout of measuring points for tunnel deformation: (a) Measuring points for vault settlement; (b) Peripheral displacement measurement points

图 1. 隧道变形测点布置图: (a) 拱顶沉降测点; (b) 周边位移测点

4. 监测结果分析

4.1. 左线变形监测结果

4.1.1. 围岩条件与支护状态

左线隧道选取隧道进口 Z3K19+174~Z3K19+265 区段内的 5 个测点进行分析, 该区段内隧道左线进口掌子面揭示围岩主要为微风化灰岩, 整体呈裂隙块状结构, 块石尺寸大小不一, 掌子面围岩呈黄褐色(新鲜面揭露), 岩石锤击声清脆, 轻微回弹, 不易击碎; 节理裂隙发育, 完整性及稳定性较差, 整体判定为较坚硬岩, 勘查报告显示该区段为 III 类围岩。地下水轻微发育, 掌子面潮湿。初期支护结构基本稳定, 未发现明显喷射混凝土剥落、开裂、大变形等异常情况。掌子面地质情况如图 2 所示。

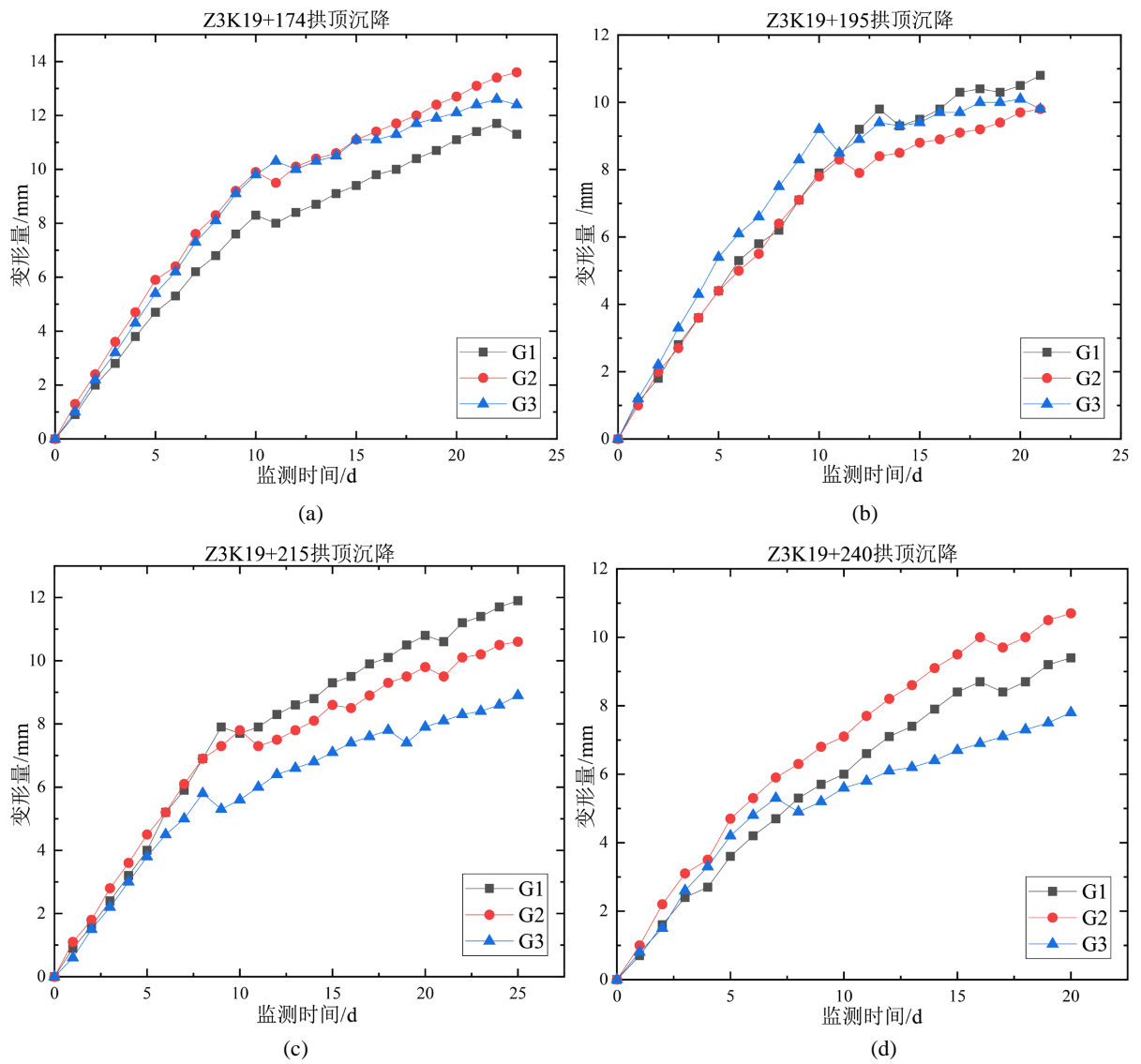
4.1.2. 拱顶沉降监测

按照监测断面间距的要求, Z3K19+174~Z3K19+265 区间内共布置了 5 个监测断面, 各个断面的拱顶沉降变形数据如图 3 所示。



Figure 2. Geological condition of the face of the entrance of Abaisi left Tunnel

图 2. 阿白寺隧道进口左线掌子面地质情况



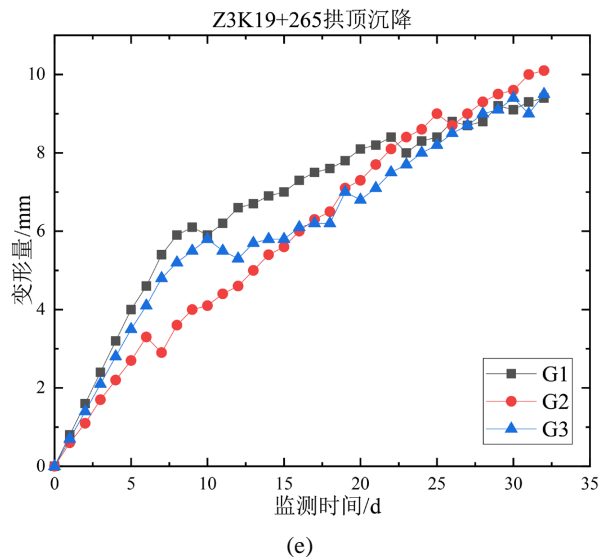


Figure 3. Settlement monitoring data of Abaisi left tunnel

图 3. 阿白寺隧道左线拱顶沉降监测数据

从图 3 中可以看出, 测点布置以后各测点沉降数据近乎呈线性增长趋势, 同一断面的 3 个沉降测点的变形数据具有一定的差异性, 随着仰拱的开挖和浇筑施工, 数据出现短暂波动, 之后位移增长速率明显降低, 除 Z3K19+174 和 Z3K19+195 断面之外, 其余断面在监测终止时并未达到明显的收敛阶段, 但位移增速均已经较小, 约为 0.1~0.3 mm/d, 远小于 1.0 mm/d, 基本达到围岩稳定条件时的变形速率。同时, 各监测断面的最终沉降位移均较小, 最大不超过 15 mm, 远小于 III 类围岩的预留变形量数值, 因此, 根据沉降变形监测结果可基本判定左线隧道围岩为稳定状态。此外, 我们注意到各测点的最终沉降数据具有明显的离散性, 尤其 Z3K19+215 和 Z3K19+240 断面各测点位移值差异性最大; 沉降最大值也并非总是出现在拱顶中心位置, 如 Z3K19+195 和 Z3K19+215 断面均为拱顶左侧的 G1 点沉降变形最大, 即靠近右洞的一侧, 可能是受到了右洞施工的扰动影响, 虽然差值并不大, 但结合沉降离散性规律, 整体上说明裂隙破碎围岩具有复杂的变形差异性时空演化效应。

4.1.3. 周边收敛监测

Z3K19+174~Z3K19+265 区间内各断面的周边收敛监测数据如图 4 所示。从图中可以看出, 测点安装以后收敛位移快速增加, 由于收敛测点布置的空间范围较大, 个别测点数据增加过程中出现波动现象, 线性增加态势不明显。仰拱施作后收敛位移增速降低, 除 Z3K19+174 和 Z3K19+195 断面之外, 其余断面在监测终止时收敛位移并未达到明显的收敛阶段, 但位移增速均已经较小, 约为 0.1~0.3 mm/d, 远小于 1.0 mm/d, 基本达到围岩稳定的变形速率。收敛位移同样出现明显的离散性特征, 其中 Z3K19+195 和 Z3K19+215 断面最为明显。周边收敛大部分表现为水平收敛位移较大, 如 Z3K19+174、Z3K19+215 和 Z3K19+265 三个断面数据所示, 而 Z3K19+195 和 Z3K19+240 断面数据表现出右侧测线 AC 收敛位移最大, 同样表明隧道围岩收敛数据具有一定的差异化时空演化效应。比较分析隧道周边收敛值和拱顶沉降值均可以看出, 裂隙破碎围岩具有复杂的变形差异性时空演化效应。

4.2. 右线变形监测结果

4.2.1. 围岩条件与支护状态

在围岩条件与支护状态分析中, 我们选取同等时间段内的右线 K19+300~K19+445 区段内的 5 个监测

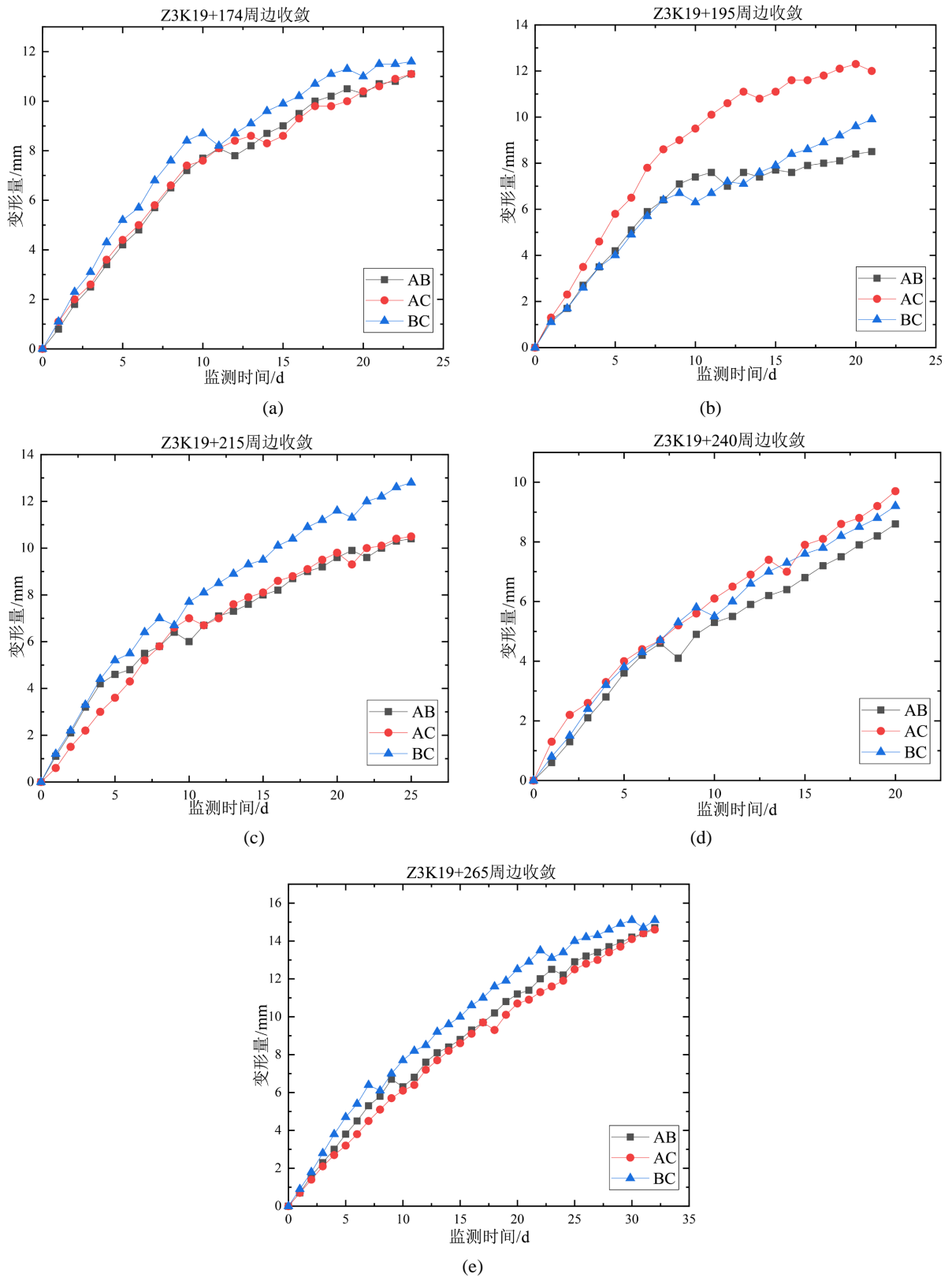


Figure 4. Convergence monitoring data of Abaisi left tunnel
 图 4. 阿白寺隧道左线周边收敛监测数据

断面数据进行分析。右线隧道掌子面揭示围岩主要为中风化灰岩, 整体呈裂隙结构, 红褐色; 岩石锤击声不清脆, 无回弹, 较易击碎; 节理裂隙发育, 结构面结合程度差, 局部呈现破碎状, 易出现掉块现象, 围岩完整性和稳定性较差, 掌子面潮湿, 整体判定为较软岩, 勘查报告显示该区段为 III 类围岩局部夹杂 V 类断层破碎围岩。初期支护观察未发现明显喷射混凝土剥落、开裂、大变形等异常情况。掌子面地质情况如图 5 所示。

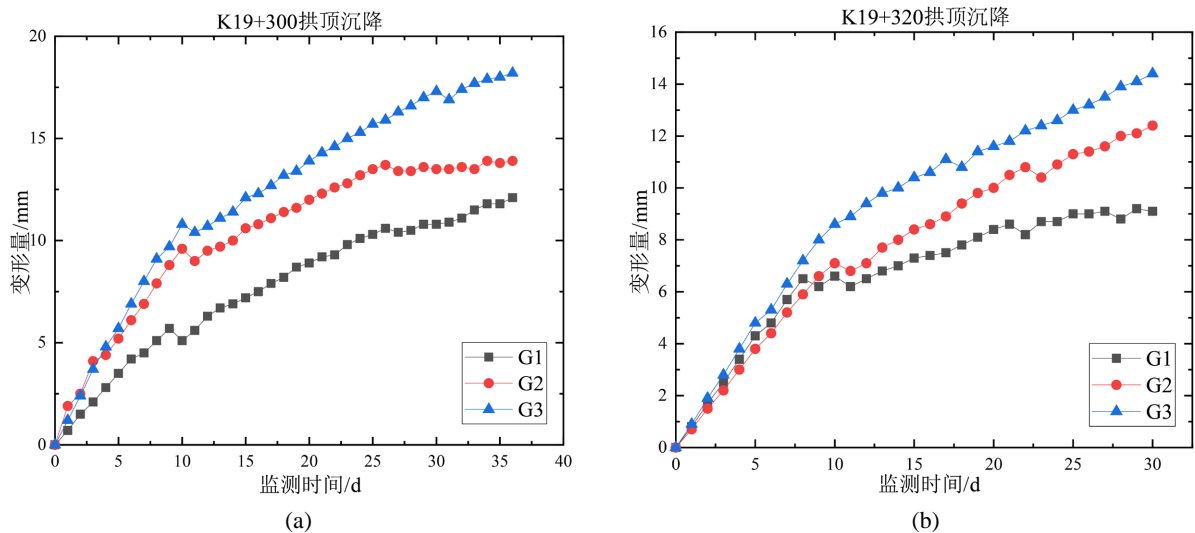


Figure 5. Geological condition of the face of the entrance of Abaisi right Tunnel

图 5. 阿白寺隧道进口右线掌子面地质情况

4.2.2. 拱顶沉降监测

右线 K19+300~K19+445 区段内 5 个监测断面的拱顶沉降监测数据如图 6 所示。从图中可以看出, 拱顶沉降数据与左线相比具有一定的差异, 但整体规律仍比较类似, 即开挖后沉降变形快速增大, 仰拱施作后增速放缓, 5 个断面在终止监测时均未达到明显收敛趋势, 沉降速率均为 0.1~0.3 mm/d, 远小于 1.0 mm/d, 基本达到围岩稳定的变形速率。从数据上看, 右洞测点沉降值的离散程度更大, 围岩差异性时空演化特征更加明显, 且个别测点沉降位移值较左洞更大, 如 K19+300 断面, 最大沉降变形 18.2 mm, 这主要是由于围岩整体较为软弱破碎且局部夹杂断层破碎带所致, 变形值远小于 III 类和 V 类围岩预留变形量。K19+300 和 K19+320 两个断面的 G3 测点沉降值最大, 推测其原因可能是受到了后续左线隧道开挖逼近的影响。因此, 后续施工过程中应进一步关注左洞开挖对右洞拱顶沉降的影响。



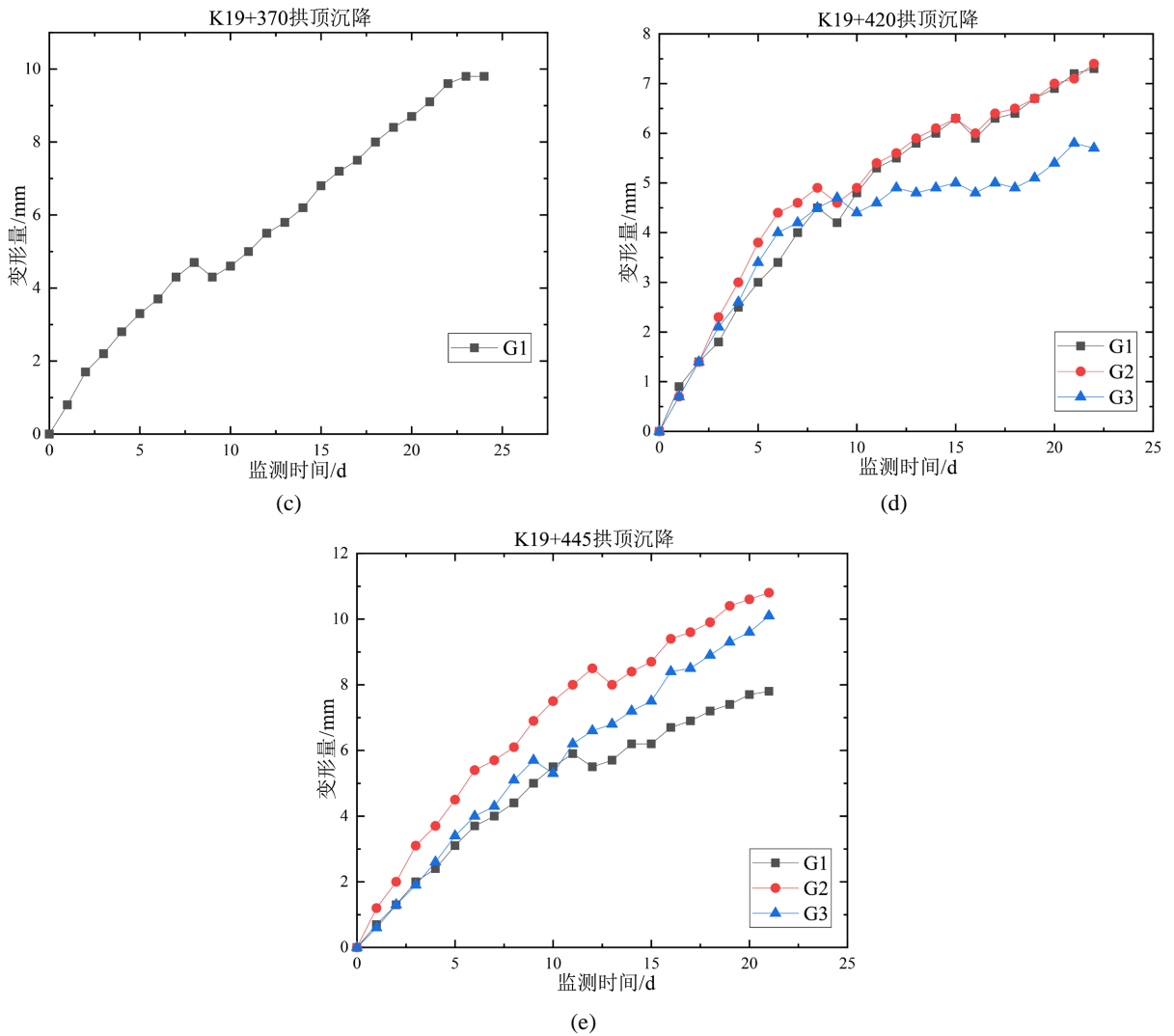
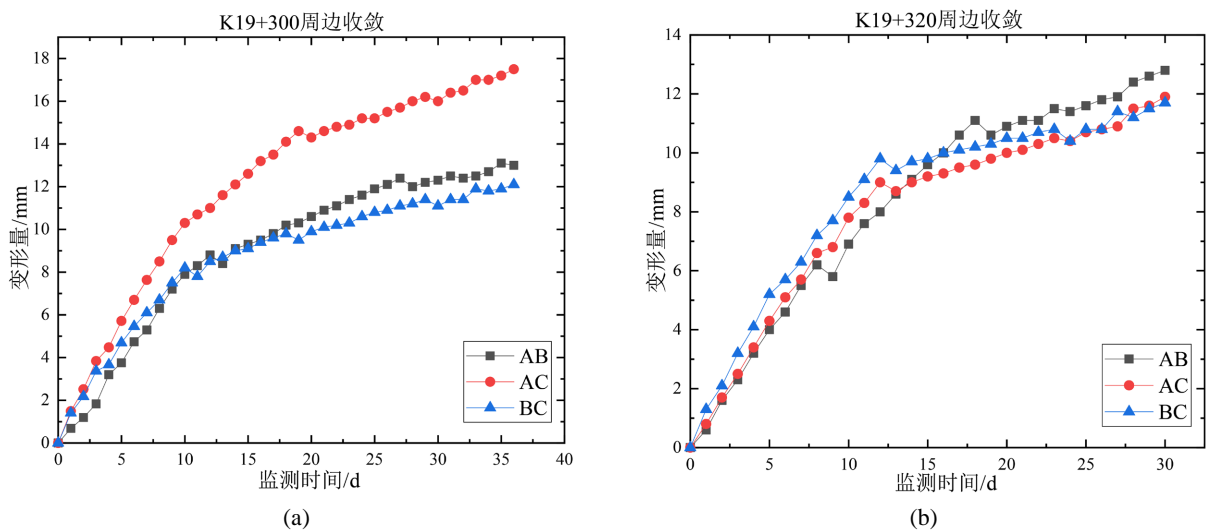


Figure 6. Settlement monitoring data of Abaisi right tunnel
图 6. 阿白寺隧道右线拱顶沉降监测数据



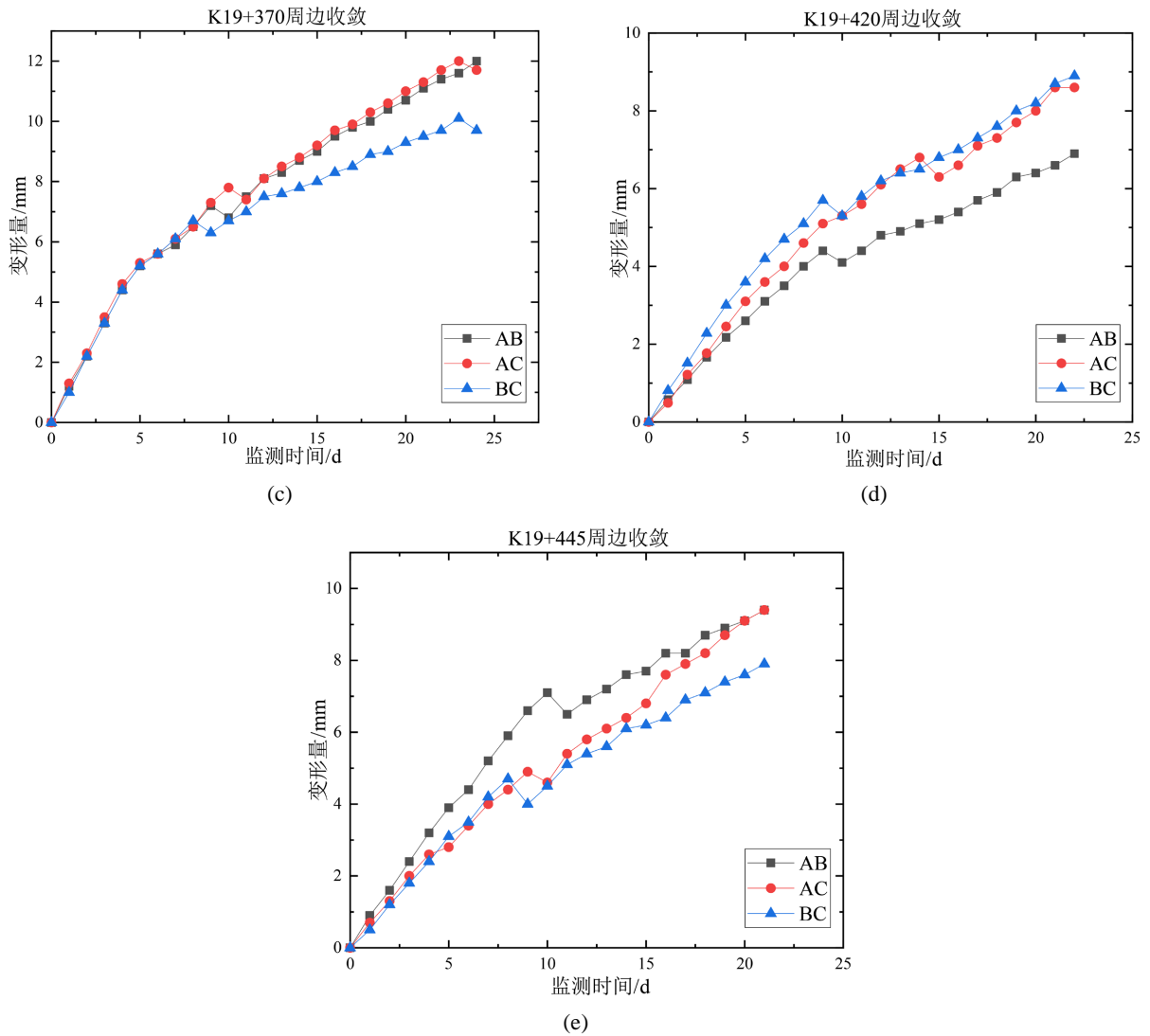


Figure 7. Convergence monitoring data of Abaisi right tunnel
图 7. 阿白寺隧道右线周边收敛监测数据

4.2.3. 周边收敛监测

右线 K19+300~K19+445 区段内 5 个监测断面的周边收敛监测数据如图 7 所示。从图中可以看出, 周边收敛监测数据与左线隧道数据规律较为一致, 但离散程度略大, 数据收敛趋势也不是很明显, 变形速率约为 0.1~0.3 mm/d, 远小于 1.0 mm/d, 基本达到围岩稳定的变形速率。由于围岩破碎程度较高, 个别断面的收敛变形数据较大。其中 K19+300 断面靠近左洞的 AC 测线收敛出现明显增大, 推测其原因可能是受到了左洞开挖逼近的影响, 后续施工过程中应进一步关注左洞开挖对右洞收敛变形的影响。

5. 结论

本文以云南建(个)元高速公路阿白寺隧道为例, 给出了裂隙破碎隧道现场变形监测的控制标准和测点布置方法, 并结合隧道实际沉降和收敛变形的监测数据进行了深入分析, 得到如下结论:

1) 位移数据的变化速率和位移时态曲线形态可用来判别围岩的稳定性状态, 当位移增加速率大于 1~5 mm/d, 或位移速率保持不变或不断上升, 以及监测数据达到或者超过预留变形量的 2/3 以上时, 应

加强观测并提出预警, 采取相应措施进行加固。

2) 拱顶沉降和周边收敛变形监测数据在测点安装后快速增大, 受仰拱施工影响出现轻微波动, 然后位移增速降低, 围岩变形逐渐趋于稳定。

3) 受裂隙发育和围岩破碎影响, 拱顶沉降和周边收敛变形监测数据表明, 裂隙破碎隧道开挖呈现明显的离散性和差异性时空演化效应特征, 即出现明显的非均匀变形现象, 且随着围岩破碎程度的增加, 离散性和差异化程度更高。因此, 对于裂隙破碎围岩, 施工过程中应注意围岩的非均匀变形现象, 确保合理的预留变形量空间。

4) 先行洞(右洞)的沉降和收敛变容易受到后行洞(左洞)开挖施工的影响, 在隧道净距较小时的临近施工过程中, 应密切关注先行洞和后行洞开挖的相互影响, 为避免开挖引起的过大的扰动, 应使先行洞和后行洞开挖保持合理的距离。

致 谢

本项目得到了中电建路桥集团有限公司(编号 HHZ-JGY-FW-03)的资助, 在此一并致谢。

参考文献

- [1] 尚海松, 曹海静, 周济兵. 蒙华铁路隧道施工变形监测数据统计分析[J]. 现代隧道技术, 2019, 56(S1): 70-76.
- [2] 夏才初, 龚建伍, 唐颖, 等. 大断面小净距公路隧道现场监测分析研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(1): 44-50.
- [3] 周丁恒, 曹力桥, 曲海锋, 等. 不同围岩情况下特大断面公路隧道施工变形监测与控制[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(12): 2510-2519.
- [4] 陈秋南, 王勤荣, 谢小鱼, 等. 扁担超大断面小净距隧道支护结构的力学性状[J]. 公路交通科技, 2012, 29(9): 89-94.
- [5] 祝云华. 骡坪隧道施工监控量测及其成果分析[J]. 工程勘察, 2011, 39(7): 7-11.
- [6] 刘国栋. 超大断面浅埋隧道围岩变形的监测研究[J]. 山西建筑, 2020, 46(5): 142-144.
- [7] 黄建国, 俞缙, 李小刚, 等. 超大断面隧道不同加宽段围岩变形及围岩压力监测分析[Z]. 隧道建设(中英文).
- [8] 牛帅斌. 大断面软岩隧道施工变形监测与分析[J]. 山西建筑, 2021, 47(6): 159-160.
- [9] 杨凯, 孙润方, 晏启祥, 等. 软弱炭质页岩隧道大变形监测及其控制技术[J]. 四川建筑, 2020, 40(6): 170-173, 176.
- [10] 赵香玲. 软弱围岩隧道变形监测与分析[J]. 河南科技, 2020, 40(6): 119-122.
- [11] 王永刚, 丁文其, 刘志强, 等. 木寨岭隧道大变形分级标准与支护时机研究[J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(4): 1116-1122.
- [12] 刘志春, 李文江, 朱永全, 等. 软岩大变形隧道二次衬砌施作时机探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(3): 580-588.
- [13] 张国华, 陈礼彪, 钱师雄, 等. 大断面小净距大帽山隧道现场监控量测及分析[J]. 岩土力学, 2010, 31(2): 489-496.
- [14] 吴勇, 王勇, 张永杰. 丽香高速某破碎围岩隧道预留变形量研究[J]. 公路, 2018, 63(5): 309-313.
- [15] 金美海, 李栋梁, 刘新荣, 刘丰铭. 不同坡度偏压黄土隧道预留变形量的研究[J]. 现代隧道技术, 2017, 54(1): 130-137.